

14. 7. 2004

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 3 年 7 月 4 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 3 - 1 9 1 7 9 7
Application Number:
[ST. 10/C]: [J P 2 0 0 3 - 1 9 1 7 9 7]

出 願 人 日 本 電 信 電 話 株 式 有 限 公 司
Applicant(s):

REC'D 02 SEP 2004

WIPO

PCT

REC'D 02 SEP 2004

WIPO

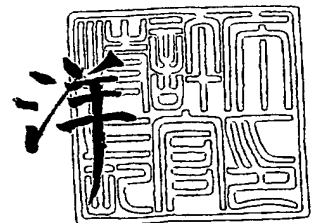
PCT

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2 0 0 4 年 8 月 1 9 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川



Best Available Copy

出証番号 出証特 2 0 0 4 - 3 0 7 4 4 4 8

【書類名】 特許願

【整理番号】 NTTH155351

【提出日】 平成15年 7月 4日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G02F 1/313

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 水野 隆之

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 高橋 浩

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 鬼頭 勤

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 小熊 学

【発明者】

【住所又は居所】 東京都千代田区大手町二丁目 3 番 1 号 日本電信電話株式会社内

【氏名】 相馬 俊一

【特許出願人】

【識別番号】 000004226

【氏名又は名称】 日本電信電話株式会社

【代理人】

【識別番号】 100078499

【弁理士】

【氏名又は名称】 光石 俊郎

【電話番号】 03-3583-7058

【選任した代理人】

【識別番号】 100102945

【弁理士】

【氏名又は名称】 田中 康幸

【電話番号】 03-3583-7058

【選任した代理人】

【識別番号】 100120673

【弁理士】

【氏名又は名称】 松元 洋

【電話番号】 03-3583-7058

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 020318

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 干渉計型光スイッチ及び可変光アッテネータ及びそれらを用いた光モジュール

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 第一の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された 2 本の光導波路からなる光路長差付与部と、前記光路長差付与部に接続された第二の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された 1 つあるいは複数の入力導波路と、前記第二の光合分波手段に接続された 1 つあるいは複数の出力導波路と、前記光路長差付与部に設けられた位相制御手段とを備えた導波路型光回路からなり、

光の波長を λ 、前記第一の光合分波手段により出力される光の位相差を $2\pi\phi_1(\lambda)$ 、前記光路長差付与部の光学的な光路長差 ΔL に起因する位相差を $2\pi\phi\Delta L(\lambda)$ 、前記第二の光合分波手段により出力される光の位相差を $2\pi\phi_2(\lambda)$ とすると、

前記 3 つの位相差の総和 $2\pi\{\phi_1(\lambda) + \phi\Delta L(\lambda) + \phi_2(\lambda)\}$ が、波長無依存になるように設定されたことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 2】 請求項 1 記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記 3 つの位相差の総和 $2\pi\{\phi_1(\lambda) + \phi\Delta L(\lambda) + \phi_2(\lambda)\}$ が、 $m \cdot \pi$ (m は整数) に設定されたことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 3】 請求項 1 又は請求項 2 記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記第一の光合分波手段の位相差と、前記第二の光合分波手段の位相差との和が、 $\Delta L/\lambda + m/2$ であることを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 4】 第一の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された 2 本の光導波路からなる光路長差付与部と、前記光路長差付与部に接続された第二の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された 1 つあるいは複数の入力導波路と、前記第二の光合分波手段に接続された 1 つあるいは複数の出力導波路と、前記光路長差付与部に設けられた位相制御手段とを備えた導波路型光回路からなり、

光の波長を λ 、前記第一の光合分波手段により出力される光の位相差を $2\pi\phi_1(\lambda)$ 、前記光路長差付与部の光学的光路長差 ΔL に起因する位相差を $2\pi\phi_{\Delta L}(\lambda)$ 、前記第二の光合分波手段により出力される光の位相差を $2\pi\phi_2(\lambda)$ とすると、

前記導波路型光回路の出力強度が波長に対して一定になるよう前記3つの位相差の総和 $2\pi\{\phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda)\}$ が設定されたことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項5】 請求項1乃至請求項4のいずれかに記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記第一の光合分波手段もしくは前記第二の光合分波手段のうち少なくとも一つが、 $N+1$ 個 (N は自然数) の光結合器と、隣接する前記光結合器に挟まれた N 個の光路長差付与部とによって構成されたものであることを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項6】 請求項5記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記第一の光合分波手段もしくは前記第二の光合分波手段のうち一方が、位相差 $2\pi\phi_c$ (定数) の光結合器であり、他方が二つの光結合器と前記二つの光結合器に挟まれた一つの光路長差付与部より構成された位相差 $2\pi\phi(\lambda)$ の光合分波手段であり、

$$\phi(\lambda) = \Delta L / \lambda + m / 2 - \phi_c$$

を満たすように、前記光合分波手段を構成する二つの光結合器の分岐比と、一つの光路長差付与部の光学的光路長差とが設定されたことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項7】 請求項5記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記第一の光合分波手段及び前記第二の光合分波手段が、夫々二つの光結合器と前記二つの光結合器に挟まれた一つの光路長差付与部より構成された光合分波手段であり、

前記第一の光合分波手段の位相差と前記第二の光合分波手段の位相差との和が

$$\phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda) = \Delta L / \lambda + m / 2$$

を満たすように、前記第一の光合分波手段及び前記第二の光合分波手段を構成する二つの光結合器の分岐比と、一つの光路長差付与部の光学的な光路長差とが設定されたことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 8】 請求項 5 乃至請求項 7 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記光結合器が、近接した 2 本の光導波路からなる方向性結合器であることを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 9】 請求項 1 乃至請求項 8 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記位相制御手段が、光導波路上に設けられた薄膜ヒータであることを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 10】 請求項 1 乃至請求項 9 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記位相制御手段の近傍に断熱溝が形成されたことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 11】 請求項 1 乃至請求項 10 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチにおいて、

前記導波路型光回路が、石英系ガラス光導波路で構成されていることを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 12】 請求項 1 乃至請求項 11 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチのうち同じ構成の 2 つの干渉計型光スイッチを用い、線対称になるように配置して、接続したことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 13】 請求項 1 乃至請求項 11 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチを多段に複数接続したことを特徴とする干渉計型光スイッチ。

【請求項 14】 請求項 1、請求項 4、請求項 5、請求項 8 乃至請求項 13 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチを用いたことを特徴とする可変光アッテネータ。

【請求項 15】 請求項 1 乃至請求項 13 のいずれかに記載の干渉計型光スイッチ、又は請求項 14 記載の可変光アッテネータを内部に有する筐体と、前

記筐体に保持され、前記干渉計型光スイッチ又は前記可変光アッテネータに信号の入出力を行う光ファイバとを有することを特徴とする光モジュール。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光通信システムや光信号処理等に用いられる導波路型光回路の光スイッチに関する。

【0002】

【従来の技術】

近年のデータ通信容量の増大に伴い、光通信システムの大容量化、高度化、高機能化が求められている。この要求に対応し、多くの波長に信号をのせ伝送容量を飛躍的に拡大させる波長分割多重伝送システムの普及が進んでいる。現在敷設されている光通信システムは、個別にノード間を結ぶポイントツーポイントシステム (Point to point system) であるが、今後は更に高機能な光クロスコネクト (Cross connect) システムや光アドドロップ多重 (Optical Add/drop multiplexing ; OADM) システムの開発が進められる。光クロスコネクトシステムは、例えば、電話局などのノード部分で伝送路の切り替えを行うシステムであり、光アドドロップ多重システムは、多重化された信号光から特定の波長を抜き取り、別の伝送路に分けたり、特定の波長に新たな信号を加えて送り出したりするシステムである。従って、これらのシステムには信号光の合分波機能の他に、光信号のまま光路の切り替え機能を可能とする空間分割型光スイッチが必要とされており、今後の光通信網を担う重要な部品の一つである。

【0003】

様々な光部品が研究開発されている中、基板上の光導波路を基本とした導波路型光部品は量産性、集積性、信頼性に優れた光部品として注目されている。導波路型光スイッチはフォトリソグラフィ技術及び微細加工技術によって、光波長以下の高精度で再現性良く量産でき、更に、スイッチを構成する基本素子が小型であるため大規模化にも適しており、最も有望な形態の光スイッチと考えられている。又、特にシリコン基板上に形成された石英系光導波路は低損失であり、信頼

性、拡張性も高いことから、今後の光通信システムの構成部品として期待されている。

【0004】

(従来技術の第1例)

従来の導波路型光部品を用いた光スイッチは、光合分波手段と、光路長差付与部より構成されている干渉計型光スイッチであった。干渉計型光スイッチの構成としては、例えば、2入力2出力のマッハツェンダ干渉計型光スイッチが知られている(非特許文献1)。

【0005】

図26は、従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの平面図である。

このマッハツェンダ干渉計型光スイッチは、二つの方向性結合器151、152と、これら二つの方向性結合器151、152に挟まれた光路長差付与部131と、光路長差付与部に形成された位相制御手段141と、入力導波路101、102と、出力導波路103、104より構成されている。例えば、方向性結合器として分岐比が $r=0.5$ の3dB方向性結合器が用いられ、位相制御手段として薄膜ヒータが用いられている。そして二つの方向性結合器151、152を結んでいる2本の光導波路(光路長差付与部)の光学的な光路長差 ΔL は、信号光の波長を $\lambda_s (=1.5\mu\text{m})$ とすると、 $\Delta L=0\cdot\lambda_s=0$ や $\Delta L=0.5\lambda_s$ になるように設定されている。図26は ΔL が $0.5\lambda_s (=0.75\mu\text{m})$ に設定されている時の構成を示している。

【0006】

図27は、図26に示すマッハツェンダ干渉計型光スイッチのB-B線矢視断面図である。

シリコン基板161上には石英系ガラスで形成されたクラッドガラス層164、167が設けられている。このクラッドガラス層164、167の中層には石英系ガラスで形成されたコアガラス部165が設けられ、光導波路が形成されている。又、上部クラッドガラス層167の表面には位相制御手段(薄膜ヒータ)141が形成されている。つまり、上記導波路型光部品は光導波路及び薄膜ヒータ等によって形成されている。

【0007】

次に、図26に示したマッハツェンダ干渉計型光スイッチのスイッチング動作を説明する。

位相制御手段（薄膜ヒータ）141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路101より入力した信号光は出力導波路103より出力され、入力導波路102より入力した信号光は出力導波路104より出力される。薄膜ヒータ141を通電し、熱光学効果により光学的な光路長を信号光の半波長 $\{0.5\lambda_s \cdot k$ (k は0以外の整数) $\}$ 相当分変化させると、光路長差は $\Delta L + 0.5\lambda_s - 0.5\lambda_s = 0$ となる。このように位相制御手段（薄膜ヒータ）141がON状態の時、スイッチはクロス状態にあり、入力導波路101より入力した信号光は出力導波路104より出力され、入力導波路102より入力した信号光は出力導波路103より出力される。このように、光路長差付与部131の光学的な光路長を変化させることにより、光路の切り替えを行うことができる。

【0008】

上記マッハツェンダ干渉計型光スイッチは単独で用いられるだけでなく、消光比を高めるように、マッハツェンダ干渉計型光スイッチの一方の出力に、同じ構成のマッハツェンダ干渉計型光スイッチを従属に接続する構成も報告されている（非特許文献2）。又、薄膜ヒータ通電時の消費電力を低減するため、位相制御手段の両端に断熱溝構造を設ける構成も報告されている（非特許文献3）。又、上記マッハツェンダ干渉計型光スイッチを基本構成素子とし、それらを複数組み合わせることにより $N \times N$ マトリクス光スイッチ（非特許文献4）、 $1 \times N$ タップ型光スイッチ（非特許文献1）、 $1 \times N$ ツリー型光スイッチ（非特許文献5）など大規模な光スイッチを構成することもできる。

【0009】

しかしながら、上記干渉計型光スイッチには次のような問題があった。

光路長差 ΔL が0以外であるマッハツェンダ干渉計（所謂、非対称型マッハツェンダ干渉計）は、原理的に波長依存性を持ち、波長によって透過率が異なる。具体的な例として、信号光の波長 λ_s を $1.5 \mu\text{m}$ に設定した場合の、波長1.

4.5 ~ 1.65 μm の帯域におけるマッハツェンダ干渉計の透過率の波長依存性を図 28 に示す。図 28 に示すように、信号光の波長 $\lambda_s = 1.5 \mu\text{m}$ では消光比は良好であるが、波長が信号光波長からずれるに伴い、ON 状態と OFF 状態の透過率の差である消光比が劣化する。例えば、波長 1.55 μm では、消光比は -20 dB 程度に劣化している。このように、従来の非対称マッハツェンダ干渉計型光スイッチでは十分な消光比を確保できる波長帯域が限られており、広い波長帯域を用いる波長分割多重伝送システムに対応することは困難であった。

【0010】

(従来技術の第 2 例)

そこで、広い波長帯域でも良好なスイッチング動作が可能な波長無依存スイッチ (Wavelength INsensitive Switch ; WINS) が提案された (非特許文献 6)。

図 29 に WINS の模式図を示す。

WINS は、1 つ目の基本回路 190 に、1 つ目の基本回路 190 に対して点対称となる基本回路が接続された構成をしている。ここで、1 つめの基本回路 190 は、二つの方向性結合器 151、152 と、これら二つの方向性結合器 151、152 に挟まれた光路長差付与部 134 と、方向性結合器 152 につながる 2 本の光導波路からなる光路長差付与部 135 と、光路長差付与部 134、135 に形成された位相制御手段 (薄膜ヒータ) 141、142 より構成されている。

【0011】

WINS は、同じ構造の基本回路二つを点対称になるように接続することにより、光結合器の波長依存性が互いに相殺されるという原理に基づき波長無依存にしている。より詳しく説明すると、点対称配置になっている光回路 (点対称回路) の出力強度は、

【数 1】

$$P_1(\lambda) = (1 - 2P_2'(\lambda))^2 \quad (\text{数式 1})$$

$$P_2(\lambda) = 1 - (1 - 2P_1'(\lambda))^2 \quad (\text{数式 2})$$

と表すことができる。ここで、 $P_1(\lambda)$ は点対称回路のバー出力の強度、 P_2 (

λ) は点対称回路のクロス出力の強度、そして $P_2'(\lambda)$ は点対称回路を構成する基本回路のクロス出力の強度である。 $P_2'(\lambda)$ が 0.5 に設定されている時、 $P_1(\lambda)$ は 0、 $P_2(\lambda)$ は 1 になるため、信号光はクロスから出力される。実際には $P_2'(\lambda)$ は波長依存性を持つため、ある波長では 0.5 になったとしても他の波長では 0.5 からずれてしまう。しかし、点対称回路の場合、例えば、ある波長 λ_a で $P_2'(\lambda_a) = 0.4$ に大きく変化したとしても、 $P_1(\lambda_a)$ は 0.04、 $P_2(\lambda)$ は 0.96 となり、点対称回路からの出力強度は殆ど変化しない。以上の原理を用いて波長無依存化が行われた。

【0012】

次に、WINS のスイッチング動作について説明する。

初期状態において、方向性結合器 151 と 154 は $r_1 = 0.8$ 、方向性結合器 152 と 153 は $r_2 = 0.3$ 、光路長差付与部 134 は $\Delta L_1 = 0.32 \mu\text{m}$ 、回路を点対称配置にするため光路長差付与部 135 は $\Delta L_2 = 0 \mu\text{m}$ 、そして光路長差付与部 136 は $\Delta L_3 = -\Delta L_1 = -0.32 \mu\text{m}$ に設定されている。ただし、光路長差は一方の光導波路（図では下側の光路）に対する他方の光導波路の相対的な光路長差を表している。この時、WINS はクロス状態にあり、入力導波路 101 から入力した信号光は出力導波路 104 より出力される。ここで、光路長差付与部の薄膜ヒータ 141、142 及び 143 へ通電し、熱光学効果により光学的な光路長をそれぞれ $\delta \Delta L_1$ 、 $\delta \Delta L_2$ 、 $\delta \Delta L_3$ だけ変化させると WINS はバー状態となり、入力導波路 101 から入力した信号光は出力導波路 103 より出力され、出力導波路 104 への出力は阻止された。その透過率の波長依存性を測定した結果、 $1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ の広い波長領域で消光比 -20 dB 以上が得られた。

【0013】

【非特許文献 1】

M. Okuno et al., "Low-loss and high extinction ratio silica-based 1xN thermo-optic switches," OECC/I00C 2001, pp.39-41

【非特許文献 2】

T. Goh et al., "High-extinction ratio and low-loss silica-base

d 8x8 thermo-optic matrix switch," IEEE Photonics Technology Letters 1998, Vol., 10, pp.358-360

【非特許文献3】

S. Sohma et al., "Low switching power silica-based super high delta thermo-optics switch with heat insulating grooves," Electronics Letters 2002, Vol.38, pp.127-128

【非特許文献4】

T. Goh et al., "Low-loss and high-extinction-ratio silica-based strictly nonblocking 16x16 thermo-optic matrix switch," IEEE Photonics Technology Letters 1998, Vol., 10, pp.810-812

【非特許文献5】

T. Watanabe et al., "Silica-based PLC 1x128 thermo-optic switch," 27th European Conference on Optical Communication 2001, ECOC '01., Vol., 2, pp.134-135

【非特許文献6】

K. Jinguji et al., "Two-port optical wavelength circuits composed of cascaded Mach-Zehnder interferometers with point-symmetrical configurations," Journal of Lightwave Technology 1996, Vol.14, pp.2301-2310

【0014】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、従来の光スイッチには次のような問題があった。

従来技術のマッハツェンダ干渉計型光スイッチは原理的に波長依存性を持ち、波長によって透過率が異なる。したがって、十分な消光比を確保できる波長帯域は限られており、広い波長帯域を用いる波長分割多重伝送システムに対応することは困難であった。又、光合分波手段の分岐比や光路長差付与部の光路長差が設計値よりずれば、マッハツェンダ干渉計の透過率の波長依存性もそれに伴い変化する。したがって、狭い波長領域でしか高消光比が確保できない従来のマッハツェンダ干渉計は作製誤差により消光比が容易に劣化するため、製造トレランスが小さいという問題があった。

【0015】

従来技術のWINSは広い波長帯域で消光比が良好であるため、広帯域波長分割多重伝送システムにも対応することができ、製造トレランスも拡大された。しかし、スイッチング動作を行うには3つの位相制御手段を同時に駆動しなければならなかった。そのため、(1)スイッチング時の消費電力が従来の数倍も増し、(2)調整箇所が増すことにより制御時間が増し、(3)スイッチング動作の制御アルゴリズムが複雑になり、(4)位相制御手段の数が増加したことにより電気配線量が従来何倍も増大するなどの多くの問題が発生し、実用的ではなかった。

【0016】

本発明は上記課題に鑑みなされたもので、広帯域でスイッチング可能であると共に、高消光比で製造トレランスが大きい干渉計型光スイッチ及びそれを用いた光スイッチモジュールを提供することを目的とする。

【0017】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決する本発明に係る干渉計型光スイッチは、

第一の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された2本の光導波路からなる光路長差付与部と、前記光路長差付与部に接続された第二の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された1つあるいは複数の入力導波路と、前記第二の光合分波手段に接続された1つあるいは複数の出力導波路と、前記光路長差付与部に設けられた位相制御手段とを備えた導波路型光回路からなり、

前記第一の光合分波手段に光を入力し、前記第一の光合分波手段につながる2本の光導波路より出力される光の位相差を $2\pi\phi_1(\lambda)$ 、

前記光路長差付与部の光学的な光路長差 ΔL に起因する位相差を $2\pi\phi\Delta L(\lambda)$ 、

前記第二の光合分波手段につながる2本の光導波路に光を入力し、前記第二の光合分波手段より出力される光の位相差を $2\pi\phi_2(\lambda)$ とすると、

前記3つの位相差の総和 $2\pi\{\phi_1(\lambda) + \phi\Delta L(\lambda) + \phi_2(\lambda)\}$ を、波長無依存になるように設定したので、出力の透過特性を波長無依存にすることが

できる。これにより広帯域で 사용할 ことができる光スイッチ、光減衰器などの導波路型干渉計を提供することができる。

波長無依存にするには、例えば、光学的光路長差に起因する位相差を第一と第二の光合分波手段の出力の位相差で打ち消すようにすればよい。

【0018】

又、前記3つの位相差の総和 $2\pi \{ \phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ を、 $m \cdot \pi$ (m は整数) に設定したので、広帯域で消光比が高い干渉計型光スイッチを提供することができる。

又、前記第一の光合分波手段の位相差と第二の光合分波手段の位相差との和を、 $\Delta L / \lambda + m / 2$ に設定してもよい。

【0019】

又、第一の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された2本の光導波路からなる光路長差付与部と、前記光路長差付与部に接続された第二の光合分波手段と、前記第一の光合分波手段に接続された1つあるいは複数の入力導波路と、前記第二の光合分波手段に接続された1つあるいは複数の出力導波路と、前記光路長差付与部に設けられた位相制御手段とを備えた導波路型光回路からなり、

前記第一の光合分波手段に光を入力し、前記第一の光合分波手段につながる2本の光導波路より出力される光の位相差を $2\pi \phi_1(\lambda)$ 、

前記光路長差付与部の光学的光路長差 ΔL に起因する位相差を $2\pi \phi_{\Delta L}(\lambda)$) 、

前記第二の光合分波手段につながる2本の光導波路に光を入力し、前記第二の光合分波手段より出力される光の位相差を $2\pi \phi_2(\lambda)$ とすると、前記導波路型光回路の出力強度が波長に対して一定になるよう前記3つの位相差の総和 $2\pi \{ \phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ を設定したので、前記光合分波手段の分岐比が波長依存性や作製誤差により設計値からずれても、広帯域にわたり出力強度が平坦な干渉計型光スイッチを提供することができる。

【0020】

前記第一の光合分波手段もしくは前記第二の光合分波手段のうち少なくとも一

つを、 $N+1$ 個 (N は自然数) の光結合器と、隣接する光結合器に挟まれた N 個の光路長差付与部とによって構成したので、 $N+1$ 個の光結合器の分岐比と N 個の光路長差付与部の光路長差を適切に設定することにより、原理的に損失無しで位相差を自由に設定できる。また、 N を大きくするほどパラメータ設定の自由度が増し、近似度が高まる。そのため、容易に、精度良く、前記 3 つの位相差の総和 $2\pi \{ \phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ を、波長無依存になるように設定することができる。

【0021】

又、前記第一の光合分波手段もしくは前記第二の光合分波手段のうち一方を、位相差 $2\pi\phi_c$ (定数) の光結合器とし、他方を二つの光結合器と前記二つの光結合器に挟まれた一つの光路長差付与部により構成された光位相差 $2\pi\phi(\lambda)$ の光り合分波手段とし、

$$\phi(\lambda) = \Delta L / \lambda + m / 2 - \phi_c \quad (\text{数式 3})$$

を満たすように、前記光合分波手段を構成する二つの光結合器の分岐比と、一つの光路長差付与部の光学的光路長差とを設定したので、広帯域で高消光比の干渉計型光スイッチを提供することができる。

【0022】

又、前記第一の光合分波手段と第二の光合分波手段を、夫々二つの光結合器と、前記二つの光結合器に挟まれた一つの光路長差付与部とにより構成される光合分波手段とし、

前記第一の光合分波手段の位相差と第二の光合分波手段の位相差との和が、

$$\phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda) = \Delta L / \lambda + m / 2 \quad (\text{数式 4})$$

を満たすように、前記第一の光合分波手段と第二の光合分波手段を構成する二つの光結合器の分岐比と、一つの光路長差付与部の光学的光路長差を設定したので、広帯域で高消光比の干渉計型光スイッチを提供することができる。

【0023】

又、前記光結合器を、近接した 2 本の光導波路からなる方向性結合器としたので、光結合器の分岐比を容易に任意の値に設定することができる。

【0024】

又、前記位相制御手段を、光導波路上に設けた薄膜ヒータとしたので、精度良く位相を変化させることができる。

【0025】

又、前記位相制御手段の近傍に断熱溝を形成したので、位相制御動作に必要な消費電力を抑えることができる。

【0026】

又、前記導波路型光回路を、石英系ガラス光導波路で構成したので、集積性に優れ、大規模化や作製費用の低コスト化に優れ、低損失で安定な導波路型光回路を提供できる。

【0027】

又、上記干渉計型光スイッチのうち同じ構成の2つの干渉計型光スイッチを用い、線対称になるように配置して、接続したので、高消光比の干渉計型光スイッチを提供することができる。

更に、上記干渉計型光スイッチを多段に複数接続することで、 $N \times N$ マトリクススイッチ、 $1 \times N$ ツリースイッチ、 $1 \times N$ タップスイッチ、 $M \times N$ のDCスイッチとしてもよい。

【0028】

又、上記構成の干渉計型光スイッチを用いて可変光アッテネータとしてもよい。この場合、位相差の総和 $2\pi \{ \phi_1(\lambda) + \phi \Delta L(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ を $m \cdot \pi$ (m は整数) 以外の値になるように設定すれば、出力強度を広帯域で可変とした可変光アッテネータにすることができる。

【0029】

又、前記導波路型光回路を内部に有する筐体と、前記筐体に保持され、前記導波路型光回路に信号の入出力を行う光ファイバを有することを特徴とすることにより、光クロスコネクシステムや光アドドロップ多重(OADM)システムなどの光通信システムに使用できる導波路型光回路の光モジュールを提供できる。

【0030】

(作用)

本発明は、光合分波手段より出力される光の位相差と光路長差付与部の光路長

差に起因する位相差の総和が波長無依存になるように設定することで、波長無依存の導波路型光回路を実現した。

【0031】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。

なお、発明の実施の形態を説明するための全図において、同一機能を有するものは同一符号を付け、その繰り返しの説明は省略する。以下の実施形態では、平面光導波路を用い、光導波路としてはシリコン基板上に形成した石英系光導波路を使用した干渉計型光スイッチについて説明する。これは平面光導波路が集積性に優れ、スイッチ規模の大規模化や作製費用の低コスト化に優れるためである。さらにこの組み合わせの光導波路が低損失で安定であり、しかも石英系光ファイバとの整合性に優れているためである。しかしながら本発明はこれらの組み合わせに限定されるものではない。又、導波路型光スイッチの説明は、一般的に広く用いられているマッハツェンダ干渉計型 2×2 基本構成素子を例に取りあげて説明する。しかしながら、本発明はこれに限定されるものではなく、他のスイッチに関しても同様に適応可能である。

【0032】

(第一の実施形態)

図1に本発明の第一実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す。

本回路は、出力の位相差が波長依存性を持つ光合分波手段（位相補償カップラ）111と、光合分波手段121と、前記光合分波手段111、121に挟まれた光路長差付与部131と、前記光路長差付与部131に形成された位相制御手段141と、入力導波路101、102と、出力導波路103、104より構成されている。

【0033】

マッハツェンダ干渉計の透過特性は、図28に示したように、信号光波長 λ_s で高い消光比を有し、信号光波長から離れるほど消光比は劣化する。ここで、もし全ての波長領域を信号光波長にできれば、その波長領域全体で高い消光比を維持できる。信号光波長は光路長差付与部に位相差を与えることにより変化させる

ことができ、その与える位相差の量により信号光波長が決まる。したがって、それぞれの波長に応じて適切な位相差を与えることができれば全波長領域を信号光波長にできる。

【0034】

この原理を数式により詳細に説明する。マッハツェンダ干渉計（図26参照）の入力導波路101より信号光を入力し、出力導波路104より出力される光強度 P_c は、光路長差付与部の光学的光路長差 ΔL に起因する位相差を $\phi_{\Delta L}(\lambda)$ （ λ を波長とすると、

【数2】

$$P_c = 0.5 \cdot [1 + \cos\{2\pi\phi_{\Delta L}(\lambda)\}] \quad (\text{数式5})$$

と表される。ただし、本発明の各実施形態では、位相差は 2π で規格化した値を用いるものとする。又、マッハツェンダ干渉計を構成する2つの光合分波手段の分岐比は一定値0.5とした。上式より、従来のマッハツェンダ干渉計の出力強度は光路長差付与部の光路長差に起因する位相差が波長により変化するため、原理的に波長依存性を有することが明らかである。

【0035】

ここで、もし光路長差付与部に生じる位相差が波長に対して一定になるように設定できれば、マッハツェンダ干渉計を波長無依存にできる。そこで、光合分波手段より出力される光の位相差を利用して位相補償を行う。マッハツェンダ干渉計の第一の光合分波手段に光を入力し、この光合分波手段につながる2本の光導波路より出力される光の位相差を $\phi_1(\lambda)$ 、マッハツェンダ干渉計の第二の光合分波手段につながる2本の光導波路に光を入力し、この光合分波手段より出力される光の位相差を $\phi_2(\lambda)$ とすると、（数式5）は、

【数3】

$$P_c = 0.5 \cdot [1 + \cos\{2\pi\{\phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda)\}\}] \quad (\text{数式6})$$

と変形することができる。ここで、位相差の総和 $2\pi\{\phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda)\}$ が波長無依存になるように設定すれば、出力強度を波長無依存に

することができる。以上が本発明で用いる波長無依存化の原理である。

【0036】

具体的にマッハツェンダ干渉計型光スイッチに本発明の原理を適用する場合を説明する。光スイッチとして動作させるには、OFF状態で出力強度が0となり、ON状態で出力強度が1となるようにすればよい。したがって、位相差の総和 $2\pi \{ \phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ が $m \cdot \pi$ (m は整数) となるように設定すれば、 m が奇数の時はOFF状態、 m が偶数の時はON状態となり、スイッチング動作が可能である。

【0037】

次に、位相差の総和を一定にするための光合分波手段による位相補正量 $\Psi(\lambda)$ を導出する。 $\phi_{\Delta L}(\lambda)$ は $-\Delta L/\lambda$ で与えられるため、位相補正量 $\Psi(\lambda)$ は、

【数4】

$$\Psi(\lambda) - \frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{1}{2}m \quad (m = \text{整数}) \quad (\text{数式7})$$

となる。ここで、例えば $m = -1$ 、 $\Delta L = \lambda_c/2$ (λ_c は波長帯域の中心波長 $1.55 \mu\text{m}$) に設定した時の位相補正量 $\Psi(\lambda)$ の波長依存性を図2に示す。このような位相補正量を光路長差付与部に寄与させた時のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過特性の波長依存性を図3に示す。光路長差付与部の光路長差に起因する位相差の波長依存性が補償され、広い波長領域で高消光比が得られることがわかる。

【0038】

実際のマッハツェンダ干渉計に図2に示した位相補正量を与える方法として、出力の位相差が波長依存性を持つ光合分波手段を用いる場合を説明する。以降、このような光合分波手段を位相補償カプラと呼ぶことにする。本発明では、 $N+1$ 個 (N は自然数) の光結合器と、隣接する光結合器に挟まれた N 個の光路長差付与部とによって構成される光合分波手段を位相補償カプラとして使用した。それは、 $N+1$ 個の光結合器の分岐比と N 個の光路長差付与部の光路長差を調整す

ることによりこの光合分波手段の分岐比と出力の位相差を任意に設定することができるからである。又、Nを大きくするほどパラメータ設定の自由度が増し、目的とする特性との近似度を高めることができる。

【0039】

図1に示した本実施形態の干渉計型光スイッチは、位相補償カップラ111を一つ用いている。位相補償カップラ111に光を入力し、この位相補償カップラ111につながる2本の光導波路より出力される光の位相差を $\phi(\lambda)$ 、光合分波手段121につながる2本の光導波路に光を入力し、この光合分波手段121より出力される光の位相差を ϕ_c (定数) とすると、

【数5】

$$\phi(\lambda) = \frac{\Delta L}{\lambda} + \frac{1}{2}m - \phi_c \quad (m: \text{整数}) \quad (\text{数式8})$$

となるように、位相補償カップラ111の出力の位相差の波長依存性を設定すればよい。

【0040】

位相補償カップラ111の一例を図4に示す。

図4に示す光合分波手段(位相補償カップラ)は、二つの方向性結合器151、152と、二つの方向性結合器151、152を結んでいる2本の光導波路から成る微小光路長差付与部132と、入力導波路101、102と、出力導波路103、104より構成されている。この光合分波手段の分岐比が波長領域の中心波長 $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ で概ね0.5となり、出力される光の位相差が(数式8)を満たすように、二つの方向性結合器151、152の分岐比と一つの微小光路長差付与部132の光路長差を多重回帰近似により求めた。

上記数式5、6は簡単のため第一と第二の光合分波手段の分岐比を一定値0.5として導出した。これは理想的な場合であるが、実際には光合分波手段の分岐比は波長依存性を有するので、それも考慮する必要がある。マッハツェンダ干渉計型光スイッチをクロス出力OFF状態で使用する場合、第一と第二の光合分波手段の分岐比が等しければ、先に説明した位相補償を行うことにより高消光比を

得ることができる。したがって、第一と第二の光合分波手段の分岐比の波長依存性が概ね一致するように光合分波手段を設定した。

【0041】

設計した位相補償カプラの入力導波路101より光を入力し、出力導波路103、104より出力される光の位相差の波長依存性 $\phi(\lambda)$ と分岐比の波長依存性をそれぞれ図5、図6に示す。又、図5に位相補償カプラで補正する位相補正量 $\Phi(\lambda)$ 、すなわち(数式8)の右辺で表される所望の関数を同時に描いた。図5、図6では、数値例として ΔL を $0.34\lambda_c$ ($\doteq 0.53\mu\text{m}$)、 m を -1 、 ϕ_c を $-1/4$ に設定している。位相補償カプラは分岐比が概ね0.5の3dB光合分波手段として機能し、その出力の位相差 $\phi(\lambda)$ は波長無依存化に必要な位相補正量 $\Phi(\lambda)$ に概ね一致することがわかる。

【0042】

図7に、この位相補償カプラ111を用いて作製した干渉計型光スイッチの平面図を示す。

位相補償カプラ111を構成する方向性結合器151、152の分岐比をそれぞれ $r_1=0.3$ 、 $r_2=0.7$ とし、微小光路長差付与部の光路長を $\Delta L_1=0.30\lambda_c$ ($\doteq 0.47\mu\text{m}$)に設定した。又、マツハツェンダ干渉計の光路長を $\Delta L=0.34\lambda_c$ ($\doteq 0.53\mu\text{m}$)とし、方向性結合器153の分岐比は $r_3=0.5$ に設定した。ただし、光路長差は一方の光導波路(図では下側の光路)に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。干渉計型光スイッチの光合分波手段111と153を結んでいる2本の光導波路の間隔は $250\mu\text{m}$ にした。位相制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40\mu\text{m}$ 、長さを 4mm に設定した。

【0043】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエッチングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は0.75%、光導波路のコア断面は $6\times 6\mu\text{m}^2$ になるように作製した。

【0044】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、そ

のスイッチング特性を評価した。ここでは作製した光導波路回路を基本構成素子とするゲートスイッチとして用いた場合のスイッチング動作について説明する。

【0045】

位相制御手段（薄膜ヒータ）141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路101より入力した場合に信号光は出力導波路103より出力され、出力導波路104からは出力されないようにしている。ここで薄膜ヒータ141を通電し、熱光学効果により光学的な光路長を信号光の半波長相当分 $\{0.5\lambda c \cdot k$ （ k は0以外の整数） $\}$ 変化させると、光路長差は $\Delta L + \delta \Delta L = 0.34\lambda c - 0.5\lambda c = -0.16\lambda c$ となった。この時、位相制御手段（薄膜ヒータ）141はON状態でスイッチはクロス状態にあり、入力導波路101より入力された信号光は出力導波路104から出力される。すなわち、入力ポートを101とし、出力ポートを104とした時、位相制御手段がOFF状態では信号光は出力されず、位相制御手段がON状態では信号光が出力され、ゲートスイッチとして機能した。入力ポートを102とした場合も同様のスイッチング動作を確認できた。

【0046】

次に図8に、測定した透過率の波長特性を示す。比較のために、図26に示す従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性も合わせて図示した。

位相制御手段がOFF状態の時、本実施形態の干渉計型光スイッチは $1.45 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の広い波長帯域で -40 dB 以下の高消光比が得られた。位相制御手段をON状態にした時、本実施形態の干渉計型光スイッチは広い波長帯域で良好な挿入損失が得られた。

【0047】

このように、本実施形態の干渉計型光スイッチは、従来と全く異なる原理を用いて広帯域にわたる高消光比を実現し、従来技術とは異なり、小型であり、一つの位相制御手段のみで広帯域のスイッチング動作ができることを確認した。又、広い波長帯域でのスイッチング動作に対応しているため、光合分波手段の分岐比誤差や光路長差付与部の光路長差誤差に対する許容量が大きく、作製誤差が発生

したとしても高消光比を維持することができる干渉計型光スイッチを実現できた。

【0048】

以上、本実施形態で説明した干渉計型光スイッチでは、波長帯域が $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ の範囲で高消光比が得られるように設計したが、位相補正量を最適に設計することにより、例えば $1 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ など、任意の波長帯域で高消光比が得られるようにすることができる。さらに、出力の位相差が波長依存性を持つ光合分波手段として $N+1$ 個（ N は1以上の整数）の光合分波手段と、隣接する光合分波手段に挟まれた N 個の光路長差付与部とによって構成されている光合分波手段を用いたが、もちろんその他の光合分波手段を用いても良い。又、本実施形態で説明した構成に限らず、例えば3個の光合分波手段と隣接する光合分波手段に挟まれた2個の光路長差付与部によって構成してもよいし、異なる光合分波手段を組み合わせる位相補償カプラを構成してもよい。さらに、光合分波手段は、本実施形態で使用した方向性結合器に限らず、マルチモード干渉カプラ等、その他の種類のものを用いてもよいし、例えば位相補償カプラを構成する光合分波手段の一方を方向性結合器、他方をマルチモード干渉計カプラにするなど、複数種類の光合分波手段を用いても構わない。

そして、使用する光合分波手段の分岐比の波長依存性を考慮して位相特性を設定してもよい。又、光導波路の屈折率を局所的に変化させ、光学的な光路長差や光合分波手段の結合特性、位相特性を調整することもできる。又、本実施例では入力導波路を101、102としたが、103、104を入力導波路として使用し、101、102を出力導波路として使用しても同じ効果が得られた。又、 m が -1 になるように設計したが、 m は $+1$ でもよいし、その他の整数を用いてよい。

【0049】

以上説明したように、本発明はここで説明した構成に限らず、回路全体として見た時に、設定した波長帯域や周波数帯域全域で回路を構成する光合分波手段の出力の位相差と光路長差付与部の光路長差に起因する位相差の総和が波長無依存になるように設定すれば、導波路の種類、導波路の形状、導波路材料、波長帯、

光合分波手段の種類などによらずに広帯域で高消光比を維持できる干渉計型光スイッチを構成することができる。

【0050】

(第一の実施形態の第1変形例)

本発明の第一の実施形態の第1変形例では、第一の実施形態における干渉計型光スイッチと同じ構成(図7参照)を用いる。

位相補償カプラ111の分岐比が波長領域の中心波長 $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ で概ね0.5となり、出力される光の位相差が(数式8)を満たすように、二つの方向性結合器151、152の分岐比と一つの微小光路長差付与部132の光路長差を多項式近似により求めた。その結果、方向性結合器151、152の分岐比をそれぞれ $r_1 = 0.3$ 、 $r_2 = 0.8$ とし、微小光路長差付与部132の光路長差を $\Delta L_1 = 0.29 \cdot \lambda_c$ ($\div 0.45 \mu\text{m}$)とし、方向性結合器153の分岐比を $r_3 = 0.5$ に設定した。又、マツハツェンダ干渉計の光路長差は $\Delta L = 0.30 \cdot \lambda_c$ ($\div 0.47 \mu\text{m}$)とし、光合分波手段111と153を結んでいる2本の光導波路の間隔は $250 \mu\text{m}$ にした。ただし、光路長差は一方の光導波路(図では下側の光路)に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。位相制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40 \mu\text{m}$ 、長さを4mmに設定した。

【0051】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエッチングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は1.5%、光導波路のコア断面は $4.5 \times 4.5 \mu\text{m}^2$ となるように作製した。本実施形態では、従来の導波路に比べて比屈折率の高い導波路を用いた。なぜなら、導波路の比屈折率を高くすると、ファイバ結合損失等の過剰損失が増す反面、導波路の最小曲率半径を小さくすることができるため、回路が小型になるからである。

【0052】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、シリコン基板下部には放熱板を設け、入出力導波路にはシングルモードファイバを

接続し、薄膜ヒータには給電リードを接続し、2入力2出力光スイッチモジュールとした。このように本実施形態の干渉計型光スイッチをモジュール化することにより、光クロスコネクトシステムや光アドドロップ多重システムなどの光通信システムに容易に導入することができる。

【0053】

次に、作製した干渉計型光スイッチモジュールのスイッチング特性を評価した。ここでは作製した光導波路回路を基本構成素子とするゲートスイッチとして用いた場合のスイッチング動作について説明する。位相制御手段（薄膜ヒータ）141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路101より入力した場合に信号光は出力導波路103より出力され、出力導波路104からは出力されないようにしている。ここで薄膜ヒータへ通電し、熱光学効果により光学的な光路長を信号光の半波長相当分 $\{0.5\lambda_c \cdot k \text{ (} k \text{ は } 0 \text{ 以外の整数)}\}$ 変化させると光路長差は $\Delta L + \delta \Delta L = 0.30\lambda_c + 0.50\lambda_c = 0.80\lambda_c$ となった。この時、位相制御手段（薄膜ヒータ）141はON状態でスイッチはクロス状態となり、入力導波路101より入力された信号光は出力導波路104から出力され、ゲートスイッチとして機能することを確認した。本実施形態では k を+1としたが、もちろん、その他の値であっても構わない。

【0054】

図9に、測定した透過率の波長特性を示す。比較のために、図26に示す従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過率の波長特性も合わせて図示した。位相制御手段がOFF状態の時、本実施形態の干渉計型光スイッチは従来型の光スイッチに比べて広い波長帯域で高消光比が得られた。位相制御手段をON状態にした時、本実施形態の干渉計型光スイッチは広い波長帯域で良好な挿入損失が得られた。

【0055】

（第一の実施形態の第2変形例）

本発明の第一の実施形態の第2変形例では、第一の実施形態における干渉計型光スイッチと同じ構成（図7）を用いた。

位相補償カプラ111の分岐比が波長領域の中心波長 $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ で概

ね 0.45 となり、出力される光の位相差が (数式 8) を満たすように、二つの方向性結合器 151、152 の分岐比と一つの微小光路長差付与部 132 の光路長差を最小二乗曲線近似により求めた。その結果、方向性結合器 151、152 の分岐比をそれぞれ $r_1 = 0.4$ 、 $r_2 = 0.8$ とし、微小光路長差付与部 132 の光路長差を $\Delta L_1 = 0.30 \lambda_c$ ($\doteq 0.47 \mu\text{m}$) とし、方向性結合器 153 の分岐比を $r_3 = 0.5$ に設定した。又、マッハツェンダ干渉計の光路長差は $\Delta L = 0.32 \lambda_c$ ($\doteq 0.50 \mu\text{m}$) とし、光合分波手段 111 と 153 を結んでいる 2 本の光導波路の間隔は $500 \mu\text{m}$ にした。ただし、光路長差は一方の光導波路 (図では下側の光路) に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。位相制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40 \mu\text{m}$ 、長さを 8mm に設定した。マッハツェンダ干渉計の光路長差は最初 $\Delta L = 0 \mu\text{m}$ に設定し、回路を作製した後、薄膜ヒータによる恒久的な局所加熱処理を行うことにより、光学的な光路長差が $\Delta L = 0.32 \lambda_c$ ($\doteq 0.50 \mu\text{m}$) になるように調整した。

【0056】

このように、最初は光路長差が 0 (零) の干渉計型光スイッチを作製しておき、作製工程で導波路の屈折率を変化させることにより光学的な光路長差が設計値になるように調整することができる。その他、薄膜ヒータによる恒久的な局所加熱処理法を用いて作製誤差を解消することもできる。すなわち、作製誤差により光学的な光路長差が設計値からずれた場合も、作製後に屈折率を調整することにより、光路長差を設計通りに補正することができる。なお、本実施形態で薄膜ヒータを用いたのは、光導波路上に既に位相制御手段として薄膜ヒータが形成されているためである。さらに、光導波路上に薄膜ヒータが装着されているため、屈折率を簡便に、精度良く調整することができる。もちろん、屈折率の調整方法は薄膜ヒータに限らず、レーザ等の光照射など、その他の手段を用いてもよい。又、本実施形態では局所加熱処理に位相制御手段用の薄膜ヒータを併用したが、恒久的な局所加熱処理専用の薄膜ヒータを設けて屈折率を調整してもよい。さらに、光合分波手段 111 を構成する方向性結合器 151、152 や微小光路長差付与部 132 の光導波路の屈折率を調整することで、光合分波手段 111 の特性を補正

することもできる。

【0057】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエッチングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は0.75%、光導波路のコア断面は $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ となるように作製した。

【0058】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、シリコン基板下部には放熱板を設け、入出力導波路には分散シフトファイバを接続し、薄膜ヒータには給電リードを接続し、2入力2出力光スイッチモジュールとした。

【0059】

次に、作製した干渉計型光スイッチモジュールのスイッチング特性を評価した。ここでは作製した光導波路回路を基本構成素子とするゲートスイッチとして用いた場合のスイッチング動作について説明する。位相制御手段（薄膜ヒータ）141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路101より入力した場合に信号光は出力導波路103より出力され、出力導波路104からは出力されないようにしている。ここで薄膜ヒータ141を通電し、熱光学効果により光学的な光路長を信号光の半波長相当分 $\{0.5\lambda_c \cdot k \text{ (} k \text{ は } 0 \text{ 以外の整数)}\}$ 変化させると光路長差は $\Delta L + \delta \Delta L = 0.32\lambda_c - 0.50\lambda_c = -0.18\lambda_c$ となった。この時、位相制御手段（薄膜ヒータ）141はON状態でスイッチはクロス状態となり、入力導波路101より入力された信号光は出力導波路104から出力され、ゲートスイッチとして機能することを確認した。

【0060】

図10に、測定した透過率の波長特性を示す。比較のために、図26に示す従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過率の波長特性も合わせて図示した。位相制御手段がOFF状態の時、本実施形態の干渉計型光スイッチは $1.45 \sim 1.63 \mu\text{m}$ の広い波長帯域で -30 dB 以下の消光比を維持することができた。位相制御手段をON状態にした時、本実施形態の干渉計型光スイッチは広い波長帯域で良好な挿入損失が得られた。本実施形態では、第1の光合分波手段（

位相補償カップラ 111) の分岐比 (0.45) と、第 2 の光合分波手段 (方向性結合器 153) の分岐比 (0.5) が異なるように設計したが、従来型の光スイッチに比べて広い波長帯域で高消光比が得られた。このように第 1 と第 2 の光合分波手段が異なる分岐比であってもよいし、分岐比の波長依存性が異なっても構わない。

【0061】

(第二の実施形態)

図 11 に本発明の第二実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す。

本回路は、出力の位相差が波長依存性を持つ光合分波手段 (位相補償カップラ) 111 と 112 と、前記光合分波手段 (位相補償カップラ) 111、112 に挟まれた光路長差付与部 131 と、前記光路長差付与部 131 に形成された位相制御手段 141 と、入力導波路 101、102 と、出力導波路 103、104 より構成されている。

【0062】

本実施形態では、位相補償カップラを複数用いた場合の構成について説明する。位相補償カップラ 111 に光を入力し、この位相補償カップラ 111 につながる 2 本の光導波路より出力される光の位相差を $\phi_1(\lambda)$ 、位相補償カップラ 112 につながる 2 本の光導波路に光を入力し、この位相補償カップラ 112 より出力される光の位相差を $\phi_2(\lambda)$ とし、 m を整数とすると、

【数 6】

$$\phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda) = \frac{\Delta L}{\lambda} + \frac{1}{2}m \quad (\text{数式 9})$$

となるように、位相補償カップラ 111 と 112 の出力の位相差の波長依存性を設定すればよい。

【0063】

ここでは、位相補償カップラ 111 と 112 として、図 4 に示す光合分波手段 (位相補償カップラ) を用いた。図 4 に示す光合分波手段 (位相補償カップラ) は、二つの方向性結合器 151、152 と、二つの方向性結合器 151、152 を結ん

でいる2本の光導波路から成る微小光路長差付与部132と、入力導波路101、102と、出力導波路103、104より構成されている。この光合分波手段の分岐比が波長領域の中心波長 $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ でそれぞれ概ね0.5となり、出力される光の位相差が(数式9)を満たすように、それぞれの位相補償カプラを構成する二つの方向性結合器151、152の分岐比と一つの微小光路長差付与部132の光路長差を最小二乗曲線近似により求めた。

【0064】

設計した位相補償カプラ111、112の位相差の合計を図12に示す。又、位相補償カプラで補正する位相補正量 $\Phi(\lambda)$ 、すなわち(数式9)の右辺で表される所望の関数を同時に描いた。図12では、数値例として ΔL を $0.16\lambda_c (\doteq 0.25 \mu\text{m})$ 、 m を -1 に設定している。二つの位相補償カプラは分岐比がそれぞれ概ね0.5の3dB光合分波手段として機能し、位相差の合計 $\phi_1(\lambda) + \phi_2(\lambda)$ は波長無依存化に必要な位相補正量 $\Phi(\lambda)$ に概ね一致することがわかる。

【0065】

図13に作製した干渉計型光スイッチの平面図を示す。

位相補償カプラ111を構成する方向性結合器151、152の分岐比をそれぞれ $r_1 = 0.4$ 、 $r_2 = 0.1$ とし、微小光路長差付与部132の光路長差を $\Delta L_1 = 0.21\lambda_c (\doteq 0.33 \mu\text{m})$ に設定した。ただし、光路長差は一方の光導波路(図では下側の光路)に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。もう一方の位相補償カプラ112を構成する方向性結合器153、154の分岐比をそれぞれ $r_3 = 0.2$ 、 $r_4 = 0.3$ とし、微小光路長差付与部133の光路長差を $\Delta L_2 = 0.17\lambda_c (\doteq 0.26 \mu\text{m})$ に設定した。又、マッハツェンダ干渉計の光路長差を $\Delta L = 0.16\lambda_c (\doteq 0.25 \mu\text{m})$ とし、光合分波手段111と112を結んでいる2本の光導波路の間隔は $200 \mu\text{m}$ にした。位相制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40 \mu\text{m}$ 、長さを 4mm に設定した。

【0066】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエ

ッティングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は1.5%、光導波路のコア断面は $4.5 \times 4.5 \mu\text{m}^2$ になるように作製した。

【0067】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、シリコン基板下部には放熱板を設け、入出力導波路にはシングルモードファイバを接続し、薄膜ヒータには給電リードを接続し、2入力2出力光スイッチモジュールとした。この干渉計型光スイッチモジュールのスイッチング特性を評価した。

【0068】

ここでは作製した光導波路回路を基本構成素子とするゲートスイッチとして用いた場合のスイッチング動作について説明する。位相制御手段（薄膜ヒータ）141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路101より入力した場合に信号光は出力導波路103より出力され、出力導波路104からは出力されないようにしている。ここで薄膜ヒータ141を通電し、熱光学効果により光学的な光路長を信号光の半波長相当分 $\{0.5\lambda_c \cdot k$ (k は0以外の整数) $\}$ 変化させると光路長差は $\Delta L + \delta \Delta L = 0.16\lambda_c - 0.5\lambda_c = -0.34\lambda_c$ となった。この時、位相制御手段（薄膜ヒータ）141はON状態でスイッチはクロス状態にあり、入力導波路101より入力された信号光は出力導波路104から出力される。すなわち、入力ポートを101とし、出力ポートを104とした時、位相制御手段がOFF状態では信号光は出力されず、位相制御手段がON状態では信号光が出力され、ゲートスイッチとして機能した。入力ポートを102とした場合も同様のスイッチング動作を確認できた。

【0069】

次に図14に、測定した透過率の波長特性を示す。比較のために、図26に示す従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性も合わせて図示した。位相制御手段がOFF状態の時、本実施形態の干渉計型光スイッチは $1.45 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の広い波長帯域で -40dB 以下の高消光比が得られた。位相制御手段をON状態にした時、本実施形態の干渉計型光スイッチは広い波長帯域で良好な挿入損失が得られた。

【0070】

このように、本実施形態の干渉計型光スイッチは従来と全く異なる原理を用いて広帯域にわたる高消光比を実現し、従来技術とは異なり一つの位相制御手段のみで広帯域スイッチング動作が可能であることを確認した。又、広い波長帯域でのスイッチング動作に対応しているため、光合分波手段の分岐比誤差や光路長差付与部の光路長差誤差に対する許容量が大きく、作製誤差が発生したとしても高消光比を維持することができる干渉計型光スイッチを実現できた。

本実施形態では2つの異なる位相補償カプラを用いているため、位相補償量と光合分波手段の分岐比の近似度が高まり、第1実施形態に比べて良好な特性を得た。また、最も理想的なマッハツェンダ干渉計型スイッチは、第一と第二光合分波手段の分岐比が波長に依らずに0.5になっている時である。本実施形態は第一と第二光合分波手段の位相差と分岐比を共に自由に設定できる構成のため、限りなく理想的な干渉計型スイッチを実現することが可能である。

【0071】

以上、本実施形態で説明した干渉計型光スイッチでは、波長帯域が1.45～1.65 μm の範囲で高消光比が得られるように設計したが、位相補正量を最適に設計することにより、例えば1 μm ～2 μm など、任意の波長帯域で高消光比が得られるようにすることができる。さらに、出力の位相差が波長依存性を持つ光合分波手段としてN+1個（Nは1以上の整数）の光合分波手段と、隣接する光合分波手段に挟まれたN個の光路長差付与部とによって構成されている光合分波手段を用いたが、もちろんその他の光合分波手段を用いても良い。又、本実施形態で説明した構成に限らず、例えば4個の光合分波手段と隣接する光合分波手段に挟まれた3個の光路長差付与部によって構成してもよいし、異なる光合分波手段を組み合わせて位相補償カプラを構成してもよい。さらに、光合分波手段は、本実施形態で使用した方向性結合器に限らず、その他の種類のものを用いても良い。そして、使用する光合分波手段の分岐比の波長依存性を考慮して位相特性を設定してもよい。又、光導波路の屈折率を局所的に変化させ、光学的な光路長差や光合分波手段の結合特性、位相特性を調整することもできる。又、本実施例では入力導波路を101、102としたが、103、104を入力導波路として使用し、101、102を出力導波路として使用しても同じ効果が得られた。又

、 m が -1 になるように設計したが、 m は $+1$ でも良いし、任意の整数を用いてよい。

【0072】

以上説明したように本発明はここで説明した構成に限らず、回路全体として見た時に、設定した波長帯域や周波数帯域全域で、回路を構成する光合分波手段の出力の位相差と光路長差付与部の光路長差に起因する位相差の総和が波長に対して一定になるようにすれば、導波路の種類、導波路の形状、導波路材料、波長帯、光合分波手段の種類などによらずに広帯域で高消光比を維持できる干渉計型光スイッチを構成することができる。

【0073】

(第三の実施形態)

図15に本発明の第三実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す。本回路は、出力の位相差が波長依存性を持つ光合分波手段（位相補償カップラ）111と、光合分波手段153と、前記光合分波手段111、153に挟まれた光路長差付与部131と、前記光路長差付与部131に形成された位相制御手段141と、入力導波路101、102と、出力導波路103、104より構成されている。又、位相補償カップラ111として、二つの方向性結合器151、152と、二つの方向性結合器151、152を結んでいる2本の光導波路から成る微小光路長差付与部132より構成される光合分波手段を用いている。さらに、基板上に断熱溝168が形成されている。

【0074】

図16は、図15に示す干渉計型光スイッチのA-A線矢視断面図である。

シリコン基板161上には石英系ガラスで形成されたクラッドガラス層164、167が設けられている。このクラッドガラス層164、167の中層には石英系ガラスで形成されたコアガラス部165が設けられ、光導波路が形成されている。又、上部クラッドガラス層167の表面には位相制御手段（薄膜ヒータ）141が形成されており、位相制御手段の両側には、断熱溝168が形成されている。又、この断熱溝168の構造は周辺のコア近傍における応力が均等になるような位置に配置されている。

【0075】

位相補償カップラ111の分岐比が波長領域の中心波長 $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ で概ね0.5となり、出力される光の位相差が(数式8)を満たすように、二つの方向性結合器151、152の分岐比と一つの微小光路長差付与部132の光路長差を非線形多項式近似により求めた。その結果、方向性結合器151、152の分岐比をそれぞれ $r_1 = 0.4$ 、 $r_2 = 0.3$ とし、微小光路長差付与部132の光路長差を $\Delta L_1 = 0.23 \cdot \lambda_c (\cong 0.36 \mu\text{m})$ とし、方向性結合器153の分岐比を $r_3 = 0.5$ に設定した。又、マッハツェンダ干渉計の光路長差は $\Delta L = 0.30 \cdot \lambda_c (\cong 0.47 \mu\text{m})$ とし、光合分波手段111と153を結んでいる2本の光導波路の間隔は $100 \mu\text{m}$ にした。ただし、光路長差は一方の光導波路(図では下側の光路)に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。位相制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40 \mu\text{m}$ 、長さを 2mm に設定した。

【0076】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエッチングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は0.75%、光導波路のコア断面は $6 \times 6 \mu\text{m}^2$ 、断熱溝の幅は $70 \mu\text{m}$ 、深さは $35 \mu\text{m}$ となるように作製した。

【0077】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、シリコン基板下部には放熱板を設け、入出力導波路にはシングルモードファイバを接続し、薄膜ヒータには給電リードを接続し、2入力2出力光スイッチモジュールとした。この干渉計型光スイッチモジュールのスイッチング特性を評価した。

【0078】

ここでは作製した光導波路回路を基本構成素子とするゲートスイッチとして用いた場合のスイッチング動作について説明する。位相制御手段(薄膜ヒータ)141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路101より入力した場合に信号光は出力導波路103より出力され、出力導波路104からは出力されないようにしている。ここで薄膜ヒータ141を通電し、熱光学効果によ

り光学的な光路長を信号光の半波長相当分 $\{0.5\lambda_c \cdot k$ (k は0以外の整数) $\}$ 変化させると光路長差は $\Delta L + \delta \Delta L = 0.30\lambda_c - 0.50\lambda_c = -0.20\lambda_c$ となった。この時、位相制御手段(薄膜ヒータ)141はON状態でスイッチはクロス状態にあり、入力導波路101より入力された信号光は出力導波路104から出力される。すなわち、入力ポートを101とし、出力ポートを104とした時、位相制御手段がOFF状態では信号光は出力されず、位相制御手段がON状態では信号光が出力され、ゲートスイッチとして機能した。入力ポートを102とした場合も同様のスイッチング動作を確認できた。又、本実施例では入力導波路を101、102としたが、103、104を入力導波路として使用し、101、102を出力導波路として使用しても同じ効果が得られた。さらに、本実施形態の光スイッチには断熱溝構造が形成されているため、スイッチングに要する位相制御手段の消費電力を従来の1/10に抑えることができた。

【0079】

本実施形態の光スイッチにおいても、位相制御手段がOFF状態の時、本実施形態の干渉計型光スイッチは、 $1.5 \sim 1.61 \mu\text{m}$ の広い波長帯域で、 -40 dB 以下の高消光比が得られた。位相制御手段をON状態にした時、本実施形態の干渉計型光スイッチは広い波長帯域で良好な挿入損失が得られた。

【0080】

以上、本実施形態の干渉計型光スイッチは、従来と全く異なる原理を用いて広帯域にわたる高消光比を実現し、従来技術とは異なり、小型であり、一つの位相制御手段のみでの広帯域スイッチング動作ができることを確認した。又、広い波長帯域でのスイッチング動作に対応しているため、光合分波手段の分岐比誤差や光路長差付与部の光路長差誤差に対する許容量が大きく、作製誤差が発生したとしても高消光比を維持することができる干渉計型光スイッチを実現できた。さらに、本実施形態の干渉計型光スイッチは基板上に断熱溝構造を有するため、スイッチング電力を極めて小さく抑えることができた。もちろん、溝の形状、位置は任意であるし、溝に空気以外の任意の材料を含んでいても良く、本実施形態で示したように平面基板上に光回路以外の構造が形成されていても良い。

【0081】

(第四の実施形態)

図17に本発明の第四実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す。

本回路は、複数の干渉計型光スイッチを用いた多重干渉計構成の光スイッチである。このような多重干渉計構成を取ると、スイッチがOFF状態の時に複数の基本構成素子により漏れ光を阻止できるので、基本構成素子単体に比べて高い消光比が得られる。

【0082】

本回路は、図7に示した第1実施形態の干渉計型光スイッチを2台接続している。そして、干渉計型光スイッチ170の一方の出力（図7の104に対応）が干渉計型光スイッチ171の一方の入力（図7の102に対応）に接続されており、干渉計型光スイッチ170の他方の出力（図7の103に対応）は出力導波路103として使用されている。干渉計型光スイッチ171の他方の入力（図7の101に対応）は入力導波路101として使用されており、入力導波路101と出力導波路103の途中は互いに交差し、交差導波路155となっている。もちろん、入力導波路と出力導波路が互いに交差しないように回路をレイアウトすることもできる。又、干渉計型光スイッチ170の一方の入力（図7の101に対応）は入力導波路102として使用されており、干渉計型光スイッチ171の一方の出力（図7の103に対応）は出力導波路104として使用されている。

【0083】

位相補償カップラの分岐比が波長領域の中心波長 $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ で概ね0.5となり、出力される光の位相差が（数式8）を満たすように、二つの方向性結合器151、152の分岐比と一つの微小光路長差付与部132の光路長差を共役勾配法により求めた。その結果、方向性結合器151、152の分岐比をそれぞれ $r_1 = 0.3$ 、 $r_2 = 0.7$ とし、微小光路長差付与部132の光路長差を $\Delta L_1 = 0.30 \lambda_c (\cong 0.47 \mu\text{m})$ とし、方向性結合器153の分岐比を $r_3 = 0.5$ に設定した。又、マッハツェンダ干渉計の光路長差は $\Delta L = 0.34 \lambda_c (\cong 0.53 \mu\text{m})$ とし、光合分波手段111と153を結んでいる2本の光導波路の間隔は $100 \mu\text{m}$ にした。ただし、光路長差は一方の光導波路（図では下側の光路）に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。位相

制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40\mu\text{m}$ 、長さを 4mm に設定した。マッハツェンダ干渉計の光路長差は最初 $\Delta L = 0\mu\text{m}$ に設定し、回路を作製した後、薄膜ヒータによる恒久的な局所加熱処理を行うことにより、光学的な光路長差が $\Delta L = 0.34\lambda_c (\cong 0.53\mu\text{m})$ になるように調整した。

本実施形態では光路長差付与部を構成する2組の光導波路にそれぞれ二つの薄膜ヒータを形成し、一方を局所加熱処理に用い、他方をスイッチング動作に用いたが、両方を局所加熱処理に用いてもよいし、両方をスイッチング動作に用いてもよい。もちろん、三つ以上の薄膜ヒータを形成してもよい。また、薄膜ヒータの形状は任意であるし、複数の薄膜ヒータの形状はそれぞれ異なっても良い。さらにまた、光路長差付与部を構成する2組の光導波路の薄膜ヒータを同時に用いて局所加熱処理やスイッチング動作を行っても良い。

【0084】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエッチングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は1.5%、光導波路のコア断面は $4.5 \times 4.5\mu\text{m}^2$ 、断熱溝の幅は $70\mu\text{m}$ 、深さは $50\mu\text{m}$ となるように作製した。

【0085】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、シリコン基板下部には放熱板を設け、入出力導波路には分散シフトファイバを接続し、薄膜ヒータには給電リードを接続し、2入力2出力光スイッチモジュールとした。この干渉計型光スイッチモジュールのスイッチング特性を評価した。

【0086】

位相制御手段（薄膜ヒータ）141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路102より入力した場合に信号光は出力導波路103より出力され、出力導波路104からは出力されないようにしている。この時、二つの基本構成素子により出力導波路104への漏れ光が阻止されるため、高い消光比が得られる。ここで干渉計型光スイッチ170、171の薄膜ヒータ141を通電し、熱光学効果により光学的な光路長を信号光の半波長相当分 $\{0.5\lambda_c \cdot k$ (k は0以外の整数) $\}$ 変化させると光路長差は $\Delta L + \delta \Delta L = 0.34\lambda_c -$

$0.50\lambda_c = -0.16\lambda_c$ となった。この時、位相制御手段（薄膜ヒータ）141はON状態でスイッチはクロス状態にあり、入力導波路102より入力された信号光は出力導波路104から出力された。又、本実施例では入力導波路を101、102としたが、103、104を入力導波路として使用し、101、102を出力導波路として使用しても同じ効果が得られた。さらに、本実施形態の光スイッチには断熱溝構造が形成されているため、スイッチングに要する位相制御手段の消費電力を従来の1/10に抑えることができた。

【0087】

次に図18に、測定した透過率の波長特性を示す。比較のために、図26に示す従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性も合わせて図示した。位相制御手段がOFF状態の時、本実施形態の干渉計型光スイッチは多重干渉計構成により、 $1.45 \sim 1.63 \mu\text{m}$ の広い波長帯域で-60dB以下の高消光比が得られた。位相制御手段をON状態にした時、本実施形態の干渉計型光スイッチは広い波長帯域で良好な挿入損失が得られた。

【0088】

以上で説明したように、本発明の干渉計型光スイッチを複数用いることにより、一つの干渉計型光スイッチとして機能させることができた。本実施形態では、同じ干渉計型光スイッチを二つ組み合わせることにより二重干渉計構造を構成したが、もちろん二つの干渉計型光スイッチは異なる設計値を用いてもよい。又、本実施形態で示した二重干渉計構成に限らず、その他の構成を取ることができるし、任意の光導波路を互いに接続して任意の光導波路を入力導波路、出力導波路として用いても良い。さらに、三つ以上のスイッチを組み合わせてもよいし、異なる構造のスイッチを複数組み合わせても構わない。

【0089】

以上、本実施形態の干渉計型光スイッチを用いることにより、広い波長帯域でスイッチング動作を行うことができた。又、広い波長帯域でのスイッチング動作に対応しているため、光合分波手段の分岐比誤差や光路長差付与部の光路長差誤差に対する許容量が大きく、作製誤差が発生したとしても高消光比を維持することができる干渉計型光スイッチを実現できた。

【0090】

(第四の実施形態の第1変形例)

図19に本発明の第四実施形態の第1変形例における干渉計型光スイッチの構成を示す。

本回路は、第二実施形態で説明した干渉計型光スイッチを2台用いた多重干渉計構成の光スイッチである。このような多重干渉計構成を取ると、スイッチがOFF状態の時に複数の基本構成素子により漏れ光を阻止できるので、基本構成素子単体に比べて高い消光比が得られる。

【0091】

本実施形態の多重干渉計型光スイッチは、回路の中心に対し線対称になるように図13の基本構成素子が2台配置されている。そして、干渉計型光スイッチ170の一方の出力(図13の104に対応)が干渉計型光スイッチ171の一方の入力(図13の104に対応)に接続されており、干渉計型光スイッチ170の他方の出力(図13の103に対応)は出力導波路103として使用されている。干渉計型光スイッチ171の他方の入力(図13の103に対応)は入力導波路101として使用されており、入力導波路101と出力導波路103の途中は互いに交差し、交差導波路155となっている、又、干渉計型光スイッチ170の一方の入力(図13の101に対応)は入力導波路102として使用されており、干渉計型光スイッチ171の一方の出力(図13の101に対応)は出力導波路104として使用されている。もちろん、第四実施形態のように2台の基本構成素子を同じ向きに配置しても良い。また、回路レイアウトは任意であり、図のように二つの基本構成素子を横に並べてもよいし、縦に並べてもかまわない。

【0092】

本実施形態の多重干渉計を構成する干渉計型光スイッチ170と171は、同じ設計値を用いた。位相補償カップラ111と112の分岐比が波長領域の中心波長 $\lambda_c = 1.55 \mu\text{m}$ でそれぞれ概ね0.5となり、出力される光の位相差が(数式9)を満たすように、それぞれの位相補償カップラを構成する二つの方向性結合器の分岐比と微小光路長差付与部の光路長差を多重回帰近似により求めた。そ

の結果、位相補償カプラ111を構成する方向性結合器151、152の分岐比をそれぞれ $r_1=0.3$ 、 $r_2=0.1$ とし、微小光路長差付与部132の光路長差を $\Delta L_1=0.19\lambda_c$ ($\doteq 0.29\mu\text{m}$) に設定した。ただし、光路長差は一方の光導波路(図では下側の光路)に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。もう一方の位相補償カプラ112を構成する方向性結合器153、154の分岐比をそれぞれ $r_3=0.1$ 、 $r_4=0.3$ とし、微小光路長差付与部133の光路長差を $\Delta L_2=0.19\lambda_c$ ($\doteq 0.29\mu\text{m}$) に設定した。又、マッハツェンダ干渉計の光路長差は $\Delta L=0.16\lambda_c$ ($\doteq 0.25\mu\text{m}$) とし、光合分波手段111と112を結んでいる2本の光導波路の間隔は $100\mu\text{m}$ にした。位相制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40\mu\text{m}$ 、長さを 4mm に設定した。

【0093】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエッチングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は 1.5% 、光導波路のコア断面は $4.5\times 4.5\mu\text{m}^2$ 、断熱溝の幅は $70\mu\text{m}$ 、深さは $50\mu\text{m}$ となるように作製した。

【0094】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、シリコン基板下部には放熱板を設け、入出力導波路にはシングルモードファイバを接続し、薄膜ヒータには給電リードを接続し、2入力2出力光スイッチモジュールとした。この干渉計型光スイッチモジュールのスイッチング特性を評価した。

【0095】

位相制御手段(薄膜ヒータ)141がOFF状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路102より入力した場合に信号光は出力導波路103より出力され、出力導波路104からは出力されないようにしている。この時、二つの基本構成素子により出力導波路104への漏れ光が阻止されるため、高い消光比が得られる。ここで干渉計型光スイッチ170、171の薄膜ヒータ141を通電し、熱光学効果により光学的な光路長を信号光の半波長相当分 $\{0.5\lambda_c \cdot k$ (k は0以外の整数) $\}$ 変化させると、光路長差は $\Delta L - \delta \Delta L = 0.16\lambda_c$

$-0.50\lambda_c = -0.34\lambda_c$ となった。この時、位相制御手段（薄膜ヒータ）141はON状態でスイッチはクロス状態にあり、入力導波路102より入力された信号光は出力導波路104から出力された。又、本実施例では入力導波路を101、102としたが、103、104を入力導波路として使用し、101、102を出力導波路として使用しても同じ効果が得られた。さらに、本実施形態の光スイッチには断熱溝構造が形成されているため、スイッチングに要する位相制御手段の消費電力を従来の1/10に抑えることができた。

【0096】

次に図20に、測定した透過率の波長特性を示す。比較のために、図26に示す従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性も合わせて図示した。

位相制御手段がOFF状態の時、本実施形態の干渉計型光スイッチは多重干渉計構成により、 $1.45 \sim 1.65 \mu\text{m}$ の広い波長帯域で -60 dB 以下、 $1.45 \sim 1.63 \mu\text{m}$ の広い波長帯域で -80 dB 以下の高消光比が得られた。位相制御手段をON状態にした時、本実施形態の干渉計型光スイッチは広い波長帯域で良好な挿入損失が得られた。

【0097】

以上で説明したように、本発明の干渉計型光スイッチを複数用いることにより、一つの干渉計型光スイッチとして機能させることができた。本実施形態では、同じ干渉計型光スイッチを二つ組み合わせることにより二重干渉計構成を構成したが、もちろん二つの干渉計型光スイッチは異なる設計値を用いてもよい。又、本実施形態で示した二重干渉計構成に限らず、例えば第1実施形態の干渉計型光スイッチと第2実施形態の干渉計型光スイッチを組み合わせることで二重干渉計を構成するなど、その他の構成を取ることができる。さらに、複数の干渉計型光スイッチを接続する方法は本実施形態に限定されず、任意の光導波路同士を互いに接続してもよく、任意の光導波路を入力導波路、出力導波路として用いても良い。さらに、三つ以上のスイッチを組み合わせることもできる。

【0098】

本実施形態では作製誤差に対するトレランスを増大させるために2つの位相補

償カプラを構成する方向性結合器の分岐比と微小光路長差付与部の光路長差が同じ値になるように設計した。そして位相補償カプラの中心に対し線対称になるようにしている。すなわち、 $r_1 = r_4$ 、 $r_2 = r_3$ 、 $\Delta L_1 = \Delta L_2$ とした。こうすることにより、例えば方向性結合器の分岐比は2種類しか使用しないので、設計通りの特性を実現するには2種類の分岐比が作製できればよい。一方、第二実施形態では4種類の異なる設計値の方向性結合器を用いているので、設計通りの特性を実現するには4種類の分岐比を作製する必要がある。その反面、第二実施形態のように第一と第二光合分波手段を異なる設計値にすると、位相差と分岐比の波長依存性の設計自由度が増すため、より近似度が高まるという特長がある。したがって、用途により作製誤差に対する耐性と設計の自由度のどちらを重視するか選択すればよい。

【0099】

さらに、多重干渉計構成どうしで比較すると、本実施形態は第4実施形態に比べて回路サイズが大きくなっている反面、設計値の種類が少ないという利点がある。すなわち、第4実施形態では分岐比の異なる3種類の方向性結合器を用いたが、本実施形態では2種類の分岐比しか使用しないので、より容易に作製することができる。さらに又、本実施形態では、線対称な干渉計型光スイッチ二つを線対称に配置し多重干渉計を構成している。非常に対称性の高い構成のため、例えば半波長板等を容易に挿入することができる。

【0100】

本実施形態では、二つの干渉計型光スイッチ170と171を同じ設計値にしたが、異なる設計値にしてもよい。例えば、本実施形態では、二つの干渉計型光スイッチの最大消光波長を共に $1.55\mu\text{m}$ 近傍に設定しているため、 $1.55\mu\text{m}$ を中心に $1.52\sim 1.57\mu\text{m}$ の最大消光波長範囲で -140dB 以上の絶対値が非常に大きい最大消光比を実現している。しかし、干渉計型光スイッチ170の最大消光波長を例えば $1.5\mu\text{m}$ 近傍、干渉計型光スイッチ171の最大消光波長を例えば $1.6\mu\text{m}$ 近傍に設定すれば、最大消光比の絶対値は小さくなるが、最大消光波長を維持することのできる波長範囲を拡大することができる。もちろんここで説明したのは一例であり、多重干渉計を構成するそれぞれの基

本構成素子を任意の特性になるように設定することができる。

【0101】

(第五の実施形態)

図21に本発明の第五実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す。

本回路は、位相補償カップラ111と、方向性結合器153と、前記光合分波手段111、153に挟まれた光路長差付与部131と、前記光路長差付与部131に形成された位相制御手段141と、入力導波路101、102と、出力導波路103、104より構成されている。

【0102】

前述の第一乃至第四の各実施形態の干渉計型光スイッチでは、特に出力強度が0か1にスイッチングされるように(数式7)を満たす場合について説明した。しかし、本発明の光スイッチは位相差の総和 $2\pi \{ \phi_1(\lambda) + \phi \Delta L(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ が波長無依存になるように $m \cdot \pi$ (m は整数)以外の値になるように設定すれば、出力強度が0と1の間の異なる値を取るようにすることもできる。そうすれば広帯域で使用できる出力強度可変の光スイッチ(広帯域可変光減衰器、所謂、可変光アッテネータ)が実現できる。

【0103】

具体的に出力の透過率を0dB、-10dB、-20dB、-30dBにするためには、それぞれの出力強度が $P_c = 1.0, 0.1, 0.01, 0.001$ となるように位相差の値を設定すればよい。光スイッチの出力強度は(数式6)で表されるので、光合分波手段と光路長差付与部による総位相差 $\{ \phi_1(\lambda) + \phi \Delta L(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ がそれぞれ-1.00、-0.60、-0.53、-0.51、-0.50となるよう設定すれば、出力の透過率がそれぞれ0dB、-10dB、-20dB、-30dBの広帯域光強度可変光スイッチにすることができる。

【0104】

図21に示す本実施形態の干渉計型光スイッチでは、位相補償カップラ111を構成する方向性結合器151、152の分岐比をそれぞれ $r_1 = 0.3$ 、 $r_2 = 0.7$ とし、微小光路長差付与部の光路長を $\Delta L_1 = 0.30 \lambda_c$ ($\approx 0.47 \mu$

m) に設定した。又、マッハツェンダ干渉計の光路長を $\Delta L = 0.34 \lambda c$ ($\approx 0.53 \mu m$) とし、方向性結合器 153 の分岐比は $r_3 = 0.5$ に設定した。ただし、光路長差は一方の光導波路 (図では下側の光路) に対する他方の光導波路の相対的な光路長をあらわしている。干渉計型光スイッチの光合分波手段 111 と 153 を結んでいる 2 本の光導波路の間隔は $200 \mu m$ にした。位相制御手段としては薄膜ヒータを用い、幅を $40 \mu m$ 、長さを $4 mm$ に設定した。

【0105】

上記設計値に基づき、火炎堆積法、フォトリソグラフィ技術、反応性イオンエッチングを用いて石英系光導波路回路を作製した。光導波路の比屈折率は 1.5% 、光導波路のコア断面は $4.5 \times 4.5 \mu m^2$ になるよう作製した。

【0106】

この干渉計型光スイッチが作製されたチップをダイシングにより切り出し、シリコン基板下部には放熱板を設け、入出力導波路にはシングルモードファイバを接続し、薄膜ヒータには給電リードを接続し、2 入力 2 出力光スイッチモジュールとした。この干渉計型光スイッチモジュールのスイッチング特性を評価した。

【0107】

位相制御手段 (薄膜ヒータ) 141 が OFF 状態の時、スイッチはバー状態にあり、入力導波路 101 より入力した場合に信号光は出力導波路 104 からは出力されない。この状態における透過率の波長依存性を最大消光時として、透過率の波長依存性を図 22 に示した。ここで薄膜ヒータ 141 を通電し、熱光学効果により光学的な光路長差をそれぞれ $\Delta L = 0.35 \lambda c$ 、 $0.37 \lambda c$ 、 $0.44 \lambda c$ 、 $0.84 \lambda c$ とすると光合分波手段と光路長差付与部による総位相差 $\{\phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda)\}$ がそれぞれ -0.51 、 -0.53 、 -0.60 、 -1.00 となり、それぞれの状態における透過率は $-30 dB$ 、 $-20 dB$ 、 $-10 dB$ 、 $0 dB$ となった。また透過率の波長依存性は、図 22 に示すように、広い波長帯域で波長無依存になった。このように、光強度可変の広帯域光スイッチとしてのスイッチング動作が確認できた。

なお、ここでは第一と第二の光合分波手段の分岐比が 0.5 である理想的な場合を説明したが、実際には波長依存性や作製誤差が発生する。厳密に平坦化する

には次のように光合分波手段の分岐比も考慮して位相差を設定すればよい。第一と第二の光合分波手段の分岐比をそれぞれ $R_1(\lambda)$ 、 $R_2(\lambda)$ とすれば、出力強度 $P_c(\lambda)$ が波長に対して一定になるよう位相差の総和を設定すれば、出力強度は波長無依存になる。具体的には、位相差の総和が

【数 7】

$$\begin{aligned} & \phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda) \\ &= \arccos \left\{ \{P_c(\lambda) - R_1(\lambda)\{1 - R_2(\lambda)\} - R_2(\lambda)\{1 - R_1(\lambda)\}\} \right. \\ & \quad \left. - [4R_1(\lambda)\{1 - R_2(\lambda)\}R_2(\lambda)\{1 - R_1(\lambda)\}]^{\frac{1}{2}} \right\} / 2\pi \end{aligned}$$

となるようにすればよい。もちろん、図 22 の特性から明らかなように、位相差の総和が一定値になるように設定しただけでも充分広い帯域にわたり透過率は一定であり、良好な特性が得られる。

【0108】

上記実施例では入力導波路 101 に光信号を入力し、出力導波路 104 より光信号を取り出したが、出力導波路 103 より光信号を取り出しても良いし、入力導波路 102 に光信号を入力しても良い。又、出力導波路 103、104 に光信号を入力し、入力導波路 101、102 より光信号を取り出しても良い。もちろん、本実施形態の光強度可変の干渉計型光スイッチに各実施形態で説明した特徴を取り入れることができる。例えば、第二実施形態で説明したように第一と第二の光合分波手段を位相補償カップラにしてもよいし、第三実施形態で説明したように断熱溝構造を形成してもよいし、第四実施形態で説明したように多重干渉計構成にし、各基本構成素子を互いに異なる条件に調整して全体の出力強度を波長に対して一定になるようにしてもよい。

【0109】

以上、本実施形態の干渉計型光スイッチは従来と全く異なる原理を用いて広帯域にわたり透過率が一定の光強度可変の光スイッチを実現した。さらに一つの位相制御手段のみでの広帯域スイッチング動作ができることを確認した。

【0110】

(その他の実施形態)

本発明の各実施形態で説明した干渉計型光スイッチは、単体で光スイッチとして用いても良いし、それらを複数組み合わせ、タップスイッチ、ゲートスイッチ、ダブルゲートスイッチや 1×2 スイッチ等の構成要素として用いても良い。又、本発明の干渉計型光スイッチを基本構成素子として用い、 $N \times N$ マトリクススイッチ（図23（a）参照）、 $1 \times N$ ツリースwitch（図23（b）参照）、 $1 \times N$ タップスイッチ、 M 個の $1 \times N$ スイッチと N 個の $M \times 1$ カプラから構成されるDC（Delivery and-Coupling）スイッチなど $M \times N$ 大規模光スイッチを構成しても良い。又、例えば光スイッチとしての機能だけでなく、AWGと組み合わせて光アドドロップ多重（OADM）回路を構成しても良い。

【0111】

又、各実施形態では、本発明を特に干渉計型光スイッチに適用した場合を説明したが、例えば広帯域動作が可能な偏光ビームスプリッタ、偏光ビームカプラを実現することもできる。又、本発明の各実施形態では光路長差付与部が一つである構成を示したが、光路長差付与部を二つ以上有する構成でも、類似の原理により波長無依存の各種導波路光回路が得られる。例えば、ラティス型フィルタ、多光束干渉フィルタ、トランスバーサル型フィルタ、マイケルソン干渉計型フィルタ、ファブリペロー干渉計型フィルタ、リング共振器付フィルタなど各種導波路型光回路に本発明の原理を適用することができる。このように、光合分波手段の出力の位相差と光路長差付与部の光路長差に起因する位相差を波長無依存に設定することにより、波長無依存の各種導波路光回路が得られる。もちろん本発明は波長依存性に限らず、周波数依存性を解消することもできる。

【0112】

以上述べた各実施形態では、干渉計型光スイッチをシリコン基板上に形成された石英系光導波路を用いて、図24に示すように作製した。

すなわち、シリコン基板161上に火炎堆積法で SiO_2 を主体にした下部クラッドガラススート162、 SiO_2 に GeO_2 を添加したコアガラススート163を堆積した（図24（a））。その後、 1000°C 以上の高温でガラス透明化を行った。この時に、下部クラッドガラス層164、コアガラス165は設計した厚さとなるように、ガラスの堆積を行った（図24（b））。引き続き、フォ

トリソグラフィ技術を用いてコアガラス165上にエッチングマスク166を形成し(図24(c))、反応性イオンエッチングによってコアガラス165のパターン化を行った(図24(d))。エッチングマスク166を除去した後、上部クラッドガラス167を再度火炎堆積法で形成した。上部クラッドガラス167には B_2O_3 や P_2O_5 などのドーパントを添加してガラス転移温度を下げ、それぞれのコアガラス165とコアガラス165の狭い隙間にも上部クラッドガラス167が入り込むようにした(図24(e))。さらに、上部クラッドガラス167の表面に薄膜ヒータとそれにつながる電気配線(図示せず)をパターン化した。

【0113】

又、実施形態で述べた光スイッチモジュールは、次のように組み立てた(図25参照)。

光モジュールは、熱伝導性の良い筐体701の内部にペルチェ保持板702を固定ネジ703で固定し、図示しないがペルチェ保持板702を掘削して作製した凹部にペルチェ素子と温度センサ(熱電対)をその近傍に配置する。ペルチェ素子及び温度センサの直上に、上記実施形態に示した干渉計型光スイッチからなるPLCチップ704が来るように配置する。PLCチップ704の端部にはガラス板705を接着剤で接着し、ファイバ706を保持しているファイバブロック707と光結合するように接着している。ファイバ706は筐体701の縁に設けた凹部に断熱性弾性接着剤708で接着してあり、さらにファイバコード709を有するファイバブーツ710を筐体701に埋め込むように保持している。PLCチップ704はペルチェ保持板に断熱性弾性接着剤708で接着されている。最後に、これらを被うように蓋をかぶせてネジ止めし、本発明の光モジュールを組み立てた。なお、蓋とネジ止め部は図示していない。なお、これはモジュール化の一例である。上記本発明の各実施形態では、入力導波路と出力導波路がチップ上の異なる端面より取り出されているが、もちろん同一端面に来るように回路をレイアウトしても構わない。そうすれば、一つのファイバブロックだけで入力導波路と出力導波路をファイバと接続することができる。

【0114】

本発明の回路は異なる独立したチップとして作製する場合もあるが、それらをチップ間で直接接続することにより一つのチップにしてもよいし、複数チップ間で光を結合させ、光モジュールを形成してもよい。又、それぞれのチップごとに別々の光モジュールを作製し、光モジュール間をファイバで結合しても良い。さらに、一つの筐体内部に上記2つ以上のチップをそれぞれペルチェ保持板の上に保持させた光モジュールを作製しても良い。

【0115】

又、本発明の干渉計型光スイッチの構成は、光導波路の種類、形状、材料、屈折率、作製法によらない。例えば、その導波路材料がポリイミド、シリコン、半導体、 LiNbO_2 などであってもよいし、基板材質が石英などであってもよい。又、例えば、その製造方法が、スピコート法、ゾルゲル法、スパッタ法、CVD法、イオン拡散法、イオンビーム直接描画法などであっても本発明は適用可能である。又、本発明の各実施形態では、正方形の光導波路を用いたが、長方形、多角形、円形など任意の形状を用いることができる。例えば、光導波路のコア幅を部分的に変え、屈折率を他の部分と異なる値にすることができる。又、光導波路に応力を付与し、屈折率の値を変化させることもできる。さらに、本回路は石英系光導波路を用いたが、異なる材料を透過するようにしても良い。例えば、光導波路中にシリコン樹脂などの材料を含んでも良いし、ポリイミド波長板を含んでも良い。又、各種温度補償法や偏波依存性低減法を適用してよい。

【0116】

又、レーザ照射などの光照射法や薄膜ヒータなどによる局所加熱法などを用いて光導波路の屈折率を局所的に変化させ、光学的な光路長差や光合分波手段の結合特性、位相特性を調整することもできる。又、光のスイッチング動作には薄膜ヒータによる熱光学効果を用いたが、これに限らず、例えば、光照射を用いても良いし、電気光学効果、磁気光学効果などを用いても良い。もちろんその領域の形状は任意である。又、本実施形態では光導波路の屈折率の波長依存性が小さかったため、屈折率は一定であるとして位相補償カブラの設計値を計算したが、大きな波長依存性を持つ場合にも、位相補償量を適切に設定することにより対応することができる。

【0117】

さらに、平面型光導波路に限らず、例えば積層光導波路や光ファイバなどを用いて光導波路を構成してもよいし、平面光導波路と光ファイバなど、複数種類の光導波路を組み合わせて構成しても良い。また光導波路にグレーティングが形成されていてもよいし、光導波路が途中で分割、分断されていてもよい。もちろん、本発明の干渉計型光スイッチは光導波路に限定されず、光を空間中に伝搬させた空間光学系で干渉回路を構成してもよい。例えば、この空間光学系は半透明鏡、全反射鏡、多層膜などにより構成されていてもよい。このように、空間光学系を用いても、回路を光導波路で構成した場合と同様の効果が実現できる。又、以上に述べた各実施形態における干渉計型光スイッチは本発明の構成例の一つであり、これらの構成に限定されるものではない。

【0118】

以上、各実施形態で用いた $N+1$ 個の光結合器と隣接する光結合器に挟まれた N 個の光路長差付与部とによって構成される光合分波手段は、位相補償カプラの構成例であり、例えば多光束干渉フィルタ、トランスバーサル型フィルタ、マイケルソン干渉計型フィルタ、ファブリペロー干渉計型フィルタ、リング共振器付フィルタなど各種フィルタ構成を光合分波手段として用いてもよい。さらに、位相補償カプラを構成する光結合器や、光合分波手段として、本発明の各実施形態で述べた方向性結合器以外にもマルチモード干渉カプラ、可変カプラ、 X 分岐カプラ、 Y 分岐カプラなど任意の種類のもを用いることができるし、またそれらを組み合わせることもできる。さらに又、上記光合分波手段に与えた結合率や光路長差付与部の光路長差の値や計算方法も一つの例である。

【0119】

【発明の効果】

以上、本発明により、広い波長帯域のスイッチング動作に対応できる干渉計型光スイッチを実現できた。又、光合分波手段の分岐比誤差や光路長差付与部の光路長差誤差に対する許容量が大きく、高消光比を維持することができる干渉計型光スイッチを実現できた。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

本発明の第一実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である。

【図 2】

本発明の第一実施形態における位相補正量の波長依存性を示す図である。

【図 3】

本発明の第一実施形態における干渉計型光スイッチの OFF 状態における透過率の波長依存性を示す図である。

【図 4】

本発明の第一実施形態で用いた位相補償カプラの模式図である。

【図 5】

本発明の第一実施形態で用いた位相補償カプラの位相差の波長依存性を示す図である。

【図 6】

本発明の第一実施形態で用いた位相補償カプラの分岐比の波長依存性を示す図である。

【図 7】

本発明の第一実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である。

【図 8】

本発明の第一実施形態における干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 9】

本発明の第一実施形態の第 1 変形における干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 10】

本発明の第一実施形態の第 2 変形における干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 11】

本発明の第二実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である

【図 12】

本発明の第二実施形態における位相補正量の波長依存性を示す図である。

【図 13】

本発明の第二実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である

【図 14】

本発明の第二実施形態における干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 15】

本発明の第三実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である

【図 16】

本発明の第三実施形態における干渉計型光スイッチの断面図である。

【図 17】

本発明の第四実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である

【図 18】

本発明の第四実施形態における干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 19】

本発明の第四実施形態の第 1 変形における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である。

【図 20】

本発明の第四実施形態の第 1 変形における干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 21】

本発明の第五実施形態における干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である

【図 2 2】

本発明の第五実施形態における干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 2 3】

本発明の干渉計型光スイッチを用いた (a) $N \times N$ スイッチ、(b) $1 \times N$ スイッチの構成例を示す模式図である。

【図 2 4】

導波路型光回路の作製工程を説明する模式図である。

【図 2 5】

本発明の干渉計型光スイッチを用いた光スイッチモジュールの模式図である。

【図 2 6】

従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの構成を示す模式図である。

【図 2 7】

従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの断面図である。

【図 2 8】

従来のマッハツェンダ干渉計型光スイッチの透過率の波長依存性を示す図である。

【図 2 9】

従来の波長無依存スイッチ (WINS) の構成を示す模式図である。

【符号の説明】

101、102：入力導波路

103、104：出力導波路

111、112：出力の位相差が波長依存性を持つ光合分波手段（位相補償カップラ）

121、122：光合分波手段

131、134、135、136：光路長差付与部

132、133：微小光路長差付与部

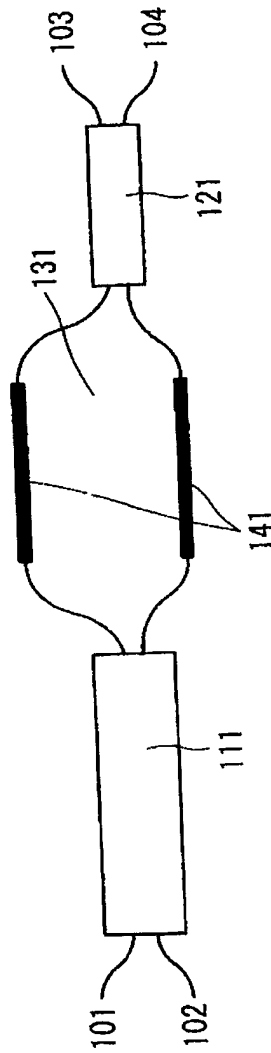
141、142、143：位相制御手段（薄膜ヒータ）

- 151、152、153、154：方向性結合器
- 155：交差導波路
- 161：基板
- 162：下部クラッドガラスシート
- 163：コアガラスシート
- 164：下部クラッドガラス
- 165：コアガラス
- 166：エッチングマスク
- 167：上部クラッドガラス
- 168：断熱溝
- 169：電気配線
- 170、171：干渉計型光スイッチ
- 180-1a～8a：入力導波路
- 181-1b～8b：出力導波路
- 182：光スイッチの基本構成素子
- 183：光スイッチの基本構成素子の交差
- 184：1×2スイッチ
- 185：ゲートスイッチ
- 701：筐体
- 702：ペルチェ保持板
- 703：固定ねじ
- 704：PLC（石英系光導波路回路）チップ
- 705：ガラス板
- 706：ファイバ
- 707：ファイバブロック
- 708：断熱性弾性接着剤
- 709：ファイバコード
- 710：ファイバブーツ

【書類名】

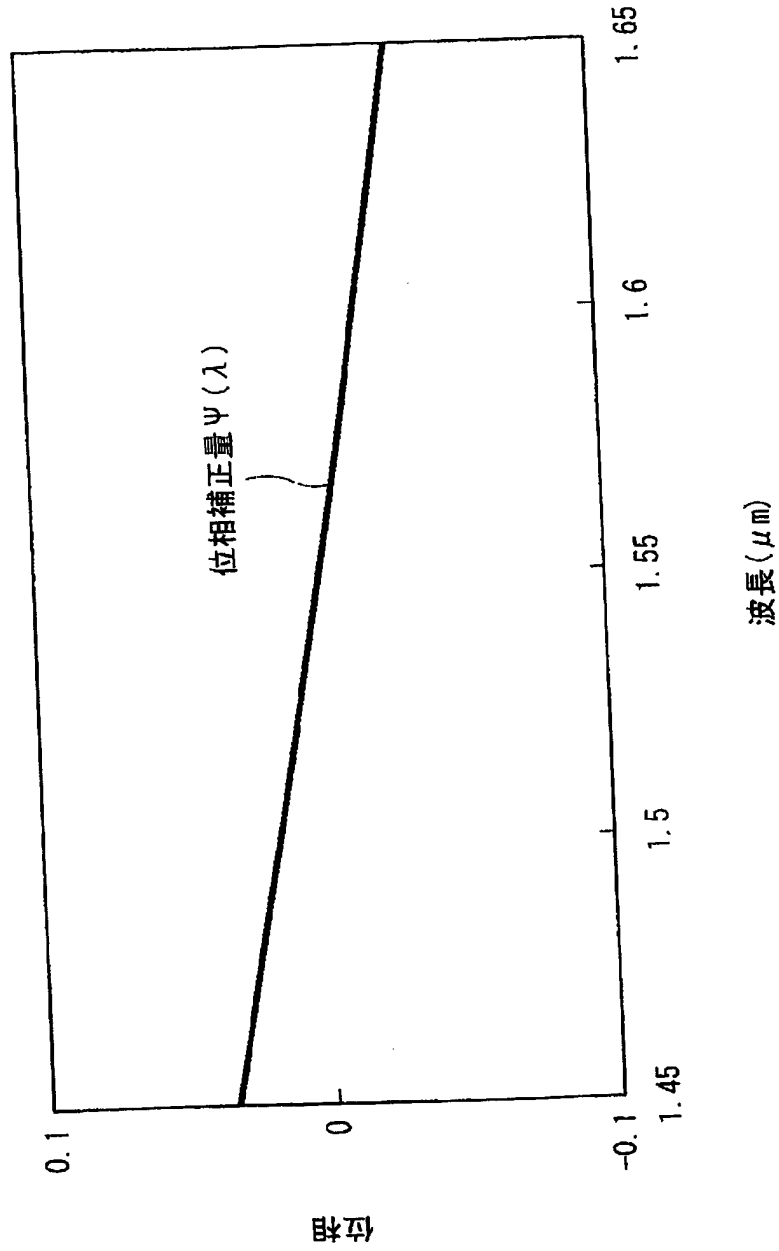
図面

【図 1】

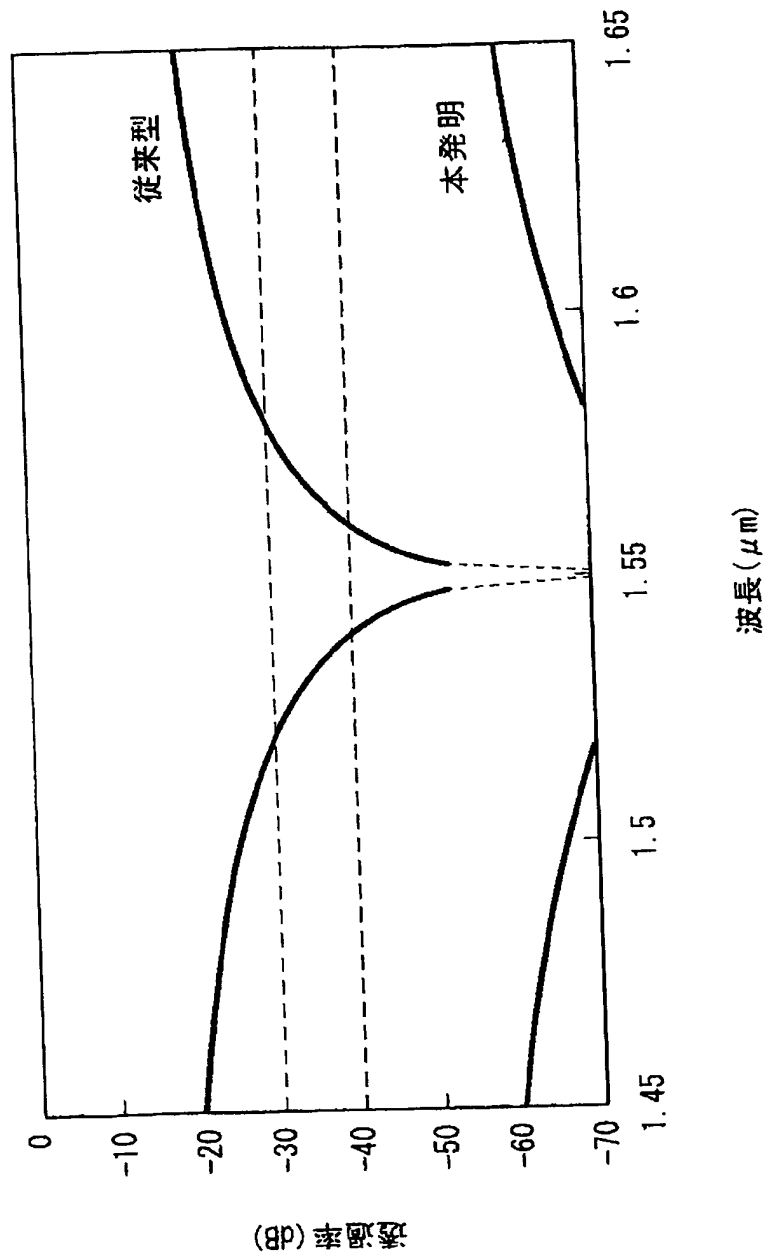


101, 102 入力導波路
103, 104 出力導波路
111 位相補償部
121 光合分波手段
131 光路長差付与部
141 薄膜ヒータ

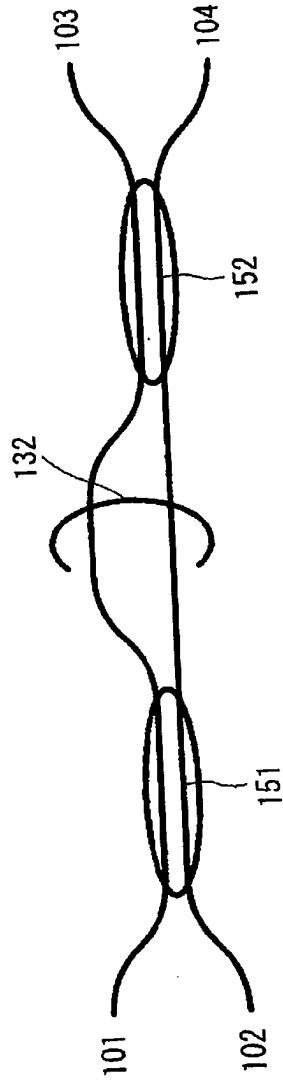
【図 2】



【図 3】

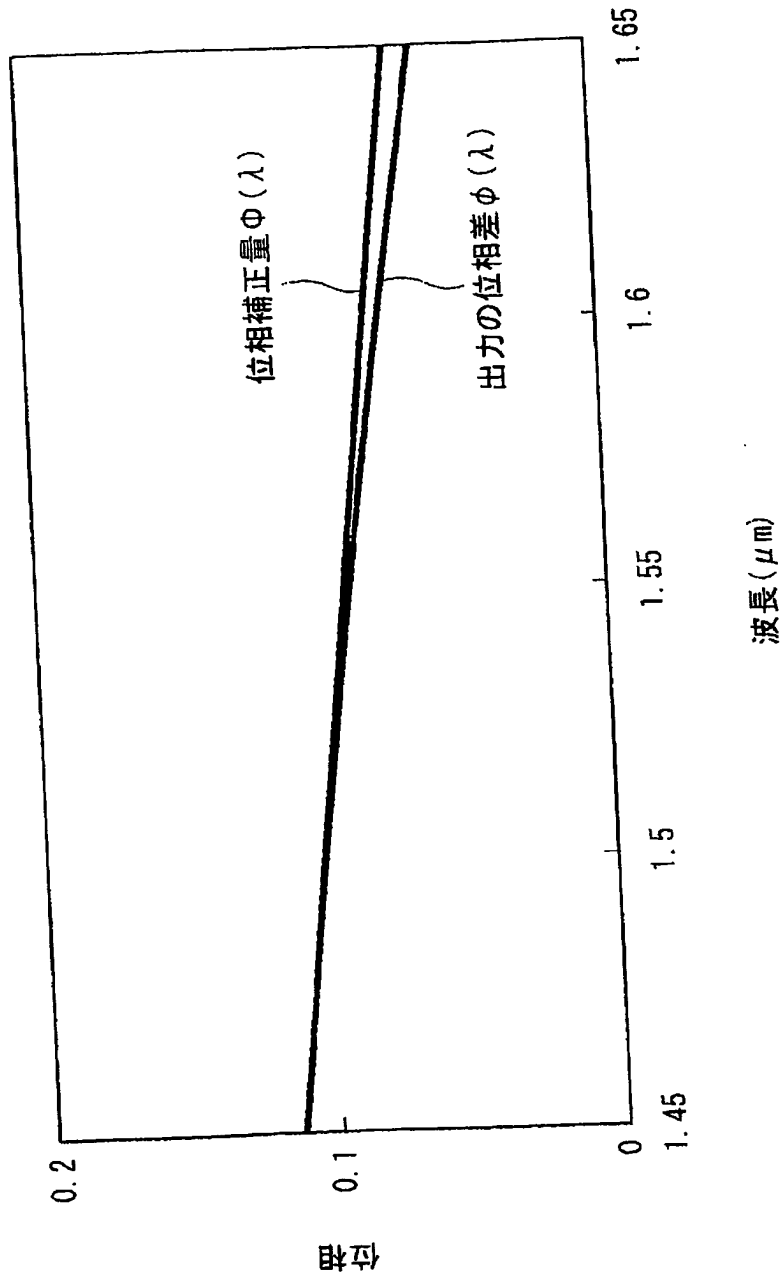


【図4】

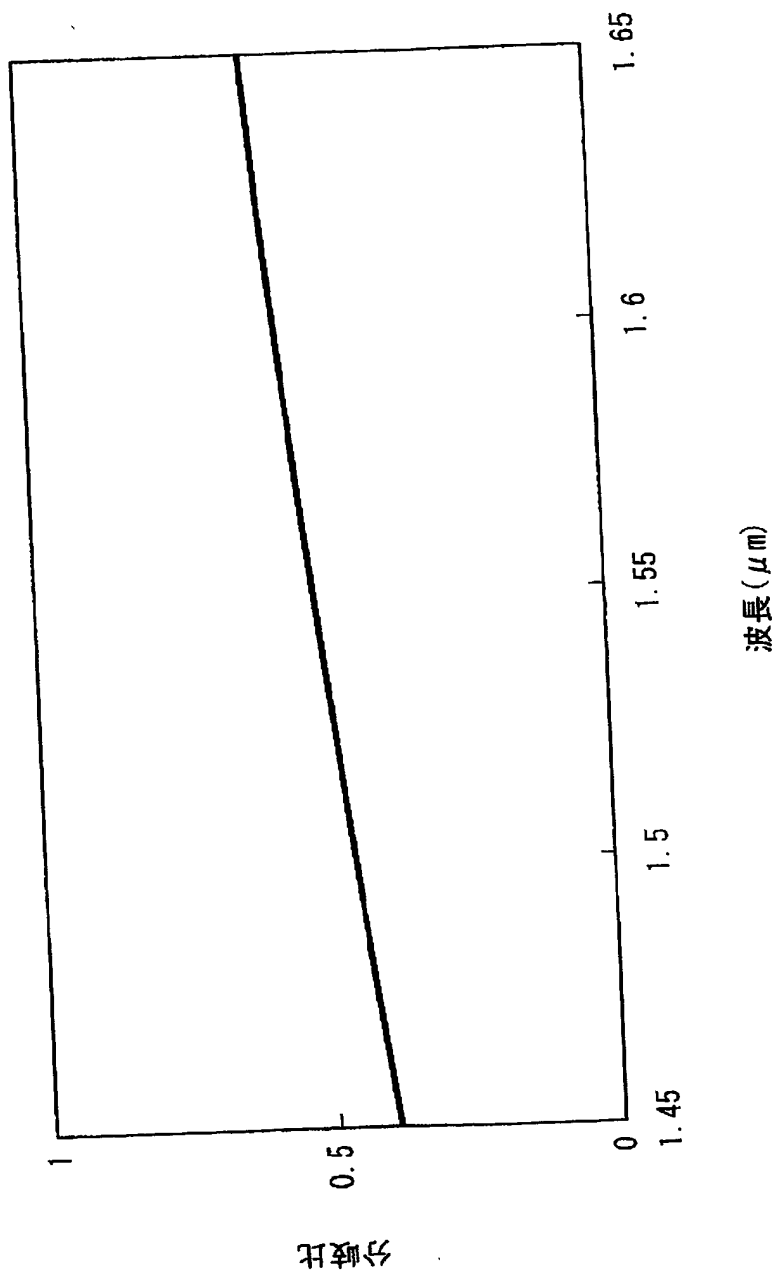


101, 102 入力導波路
103, 104 出力導波路
132 微小光路長差付与部
151, 152 方向性結合器

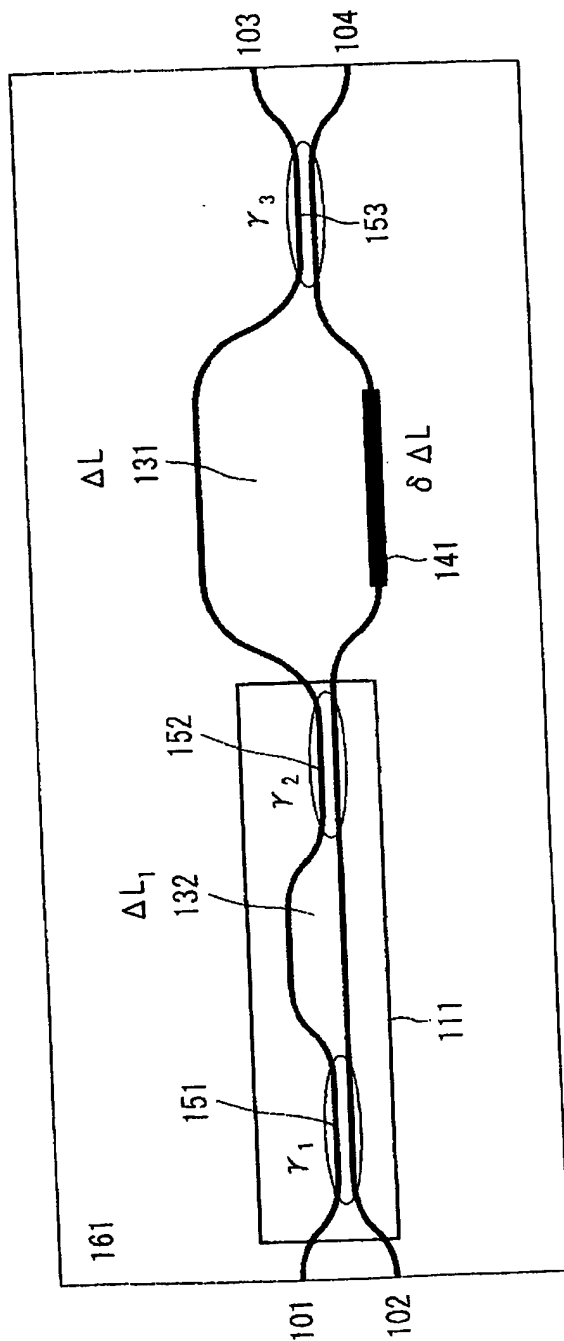
【図 5】



【図 6】

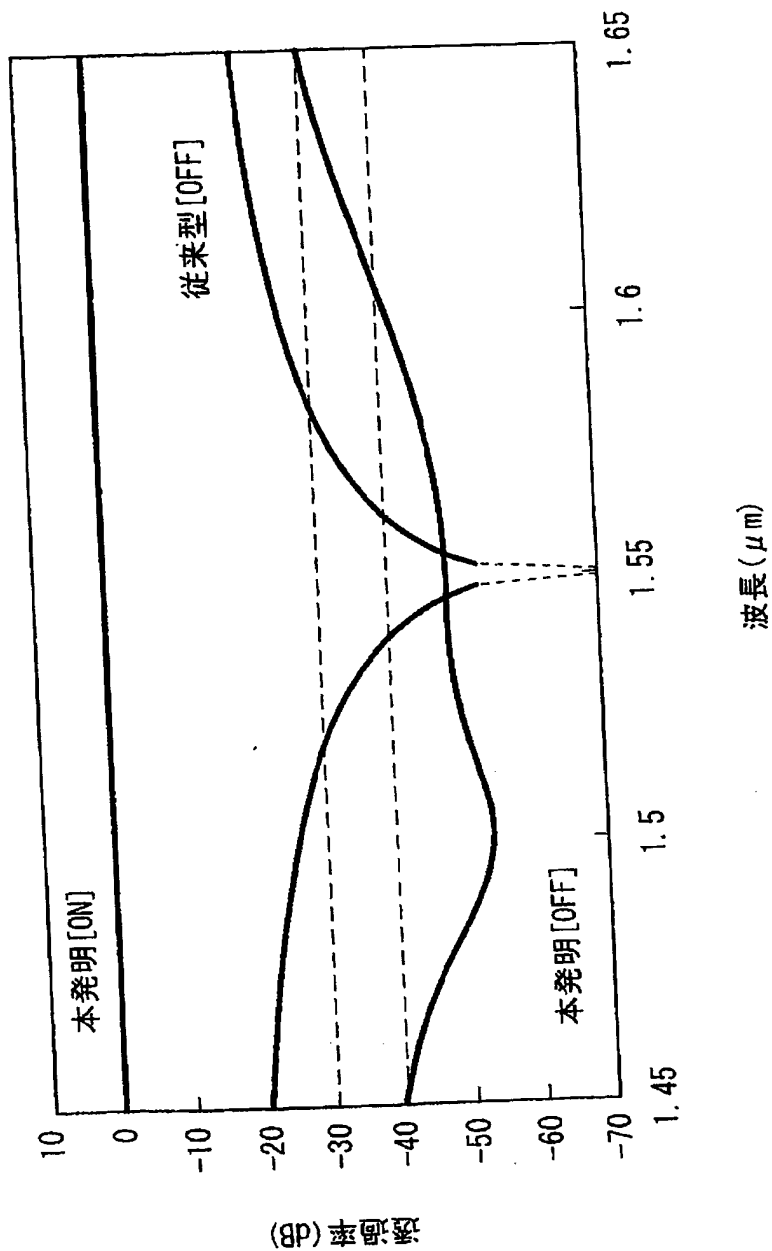


【図 7】

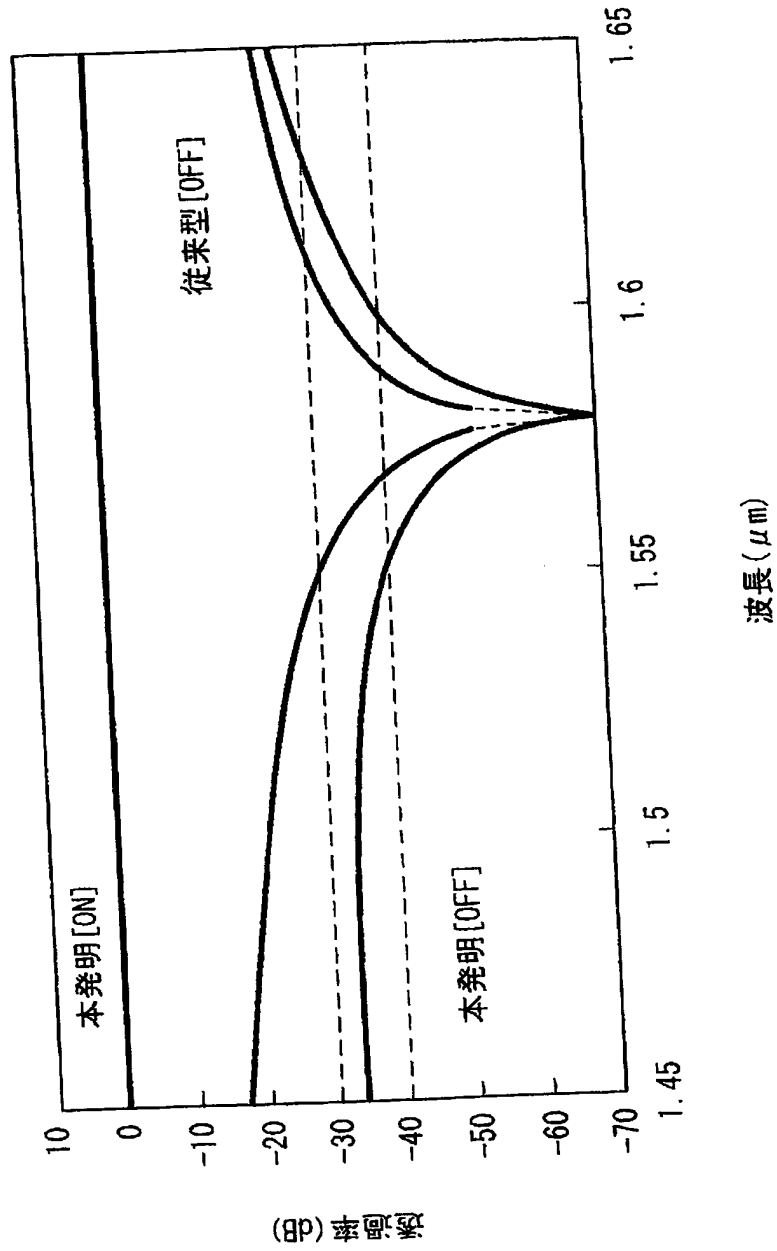


- 101, 102 入力導波路
- 103, 104 出力導波路
- 111 位相補償部
- 131 光路長差付与部
- 132 微小光路長差付与部
- 141 薄膜ヒータ
- 151, 152, 153 方向性結合器
- 161 基板

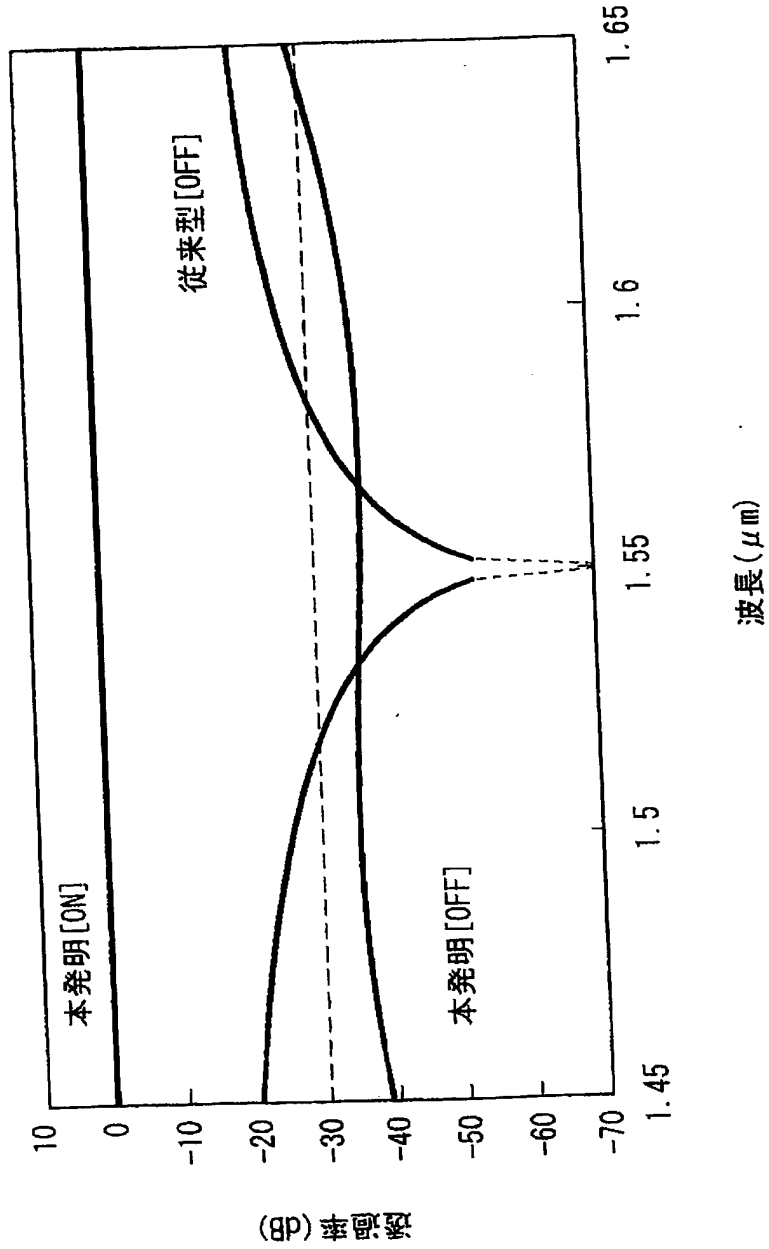
【図 8】



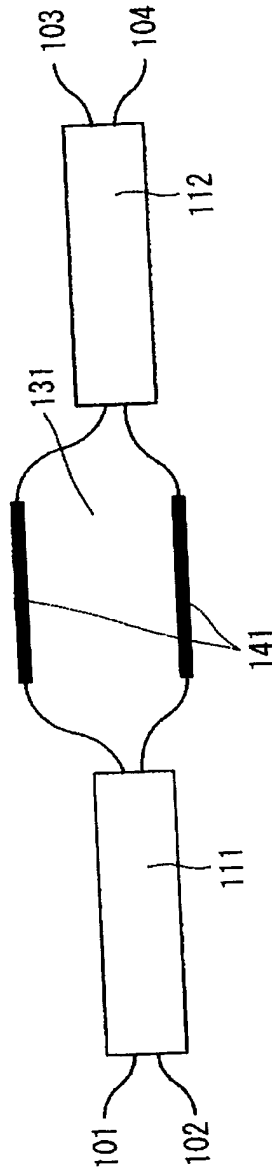
【図9】



【図 10】

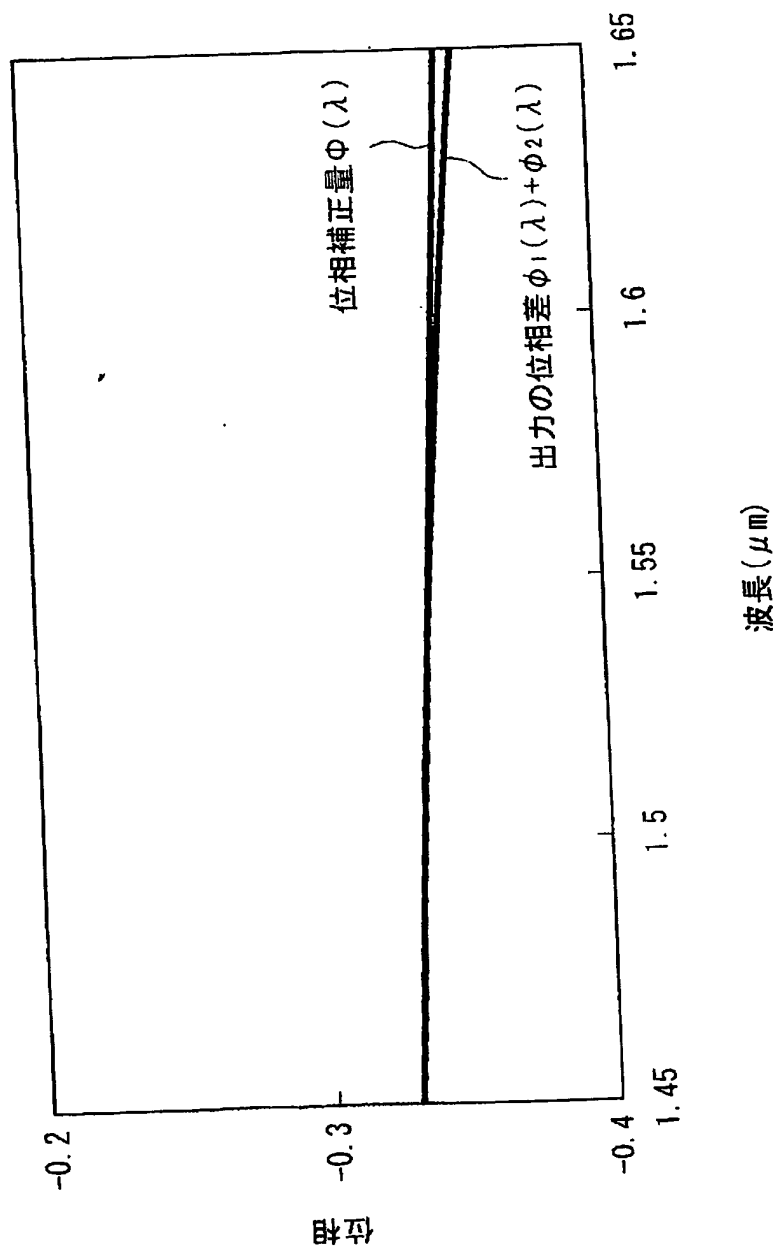


【図11】

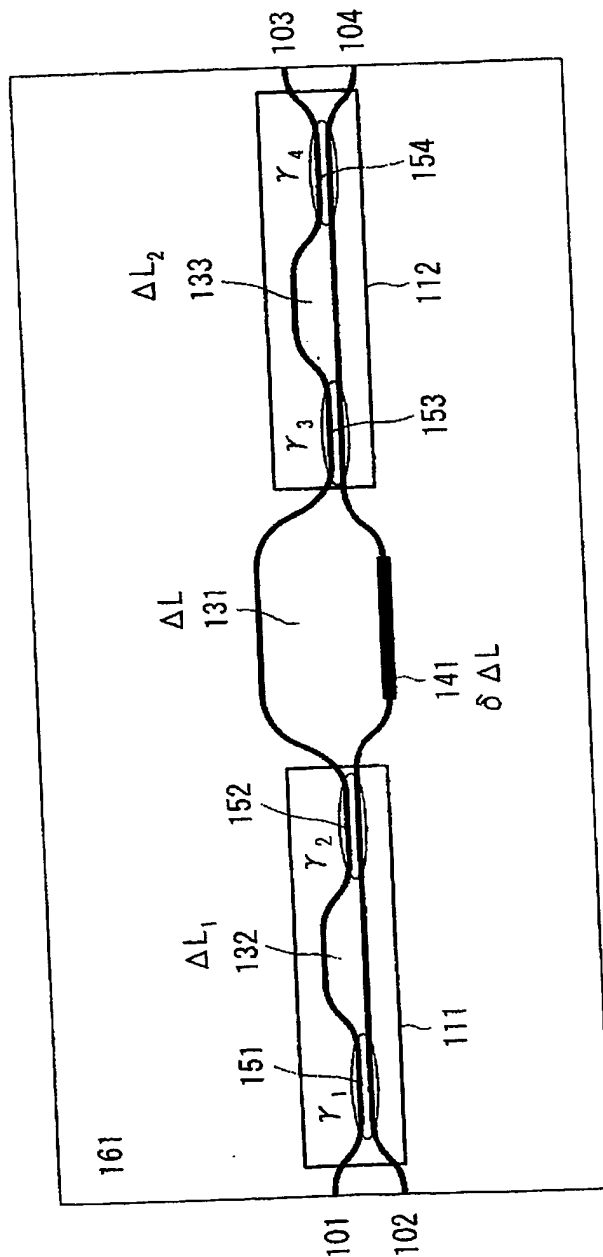


101, 102 入力導波路
103, 104 出力導波路
111, 112 位相補償部
131 光路長差与部
141 薄膜

【図 12】

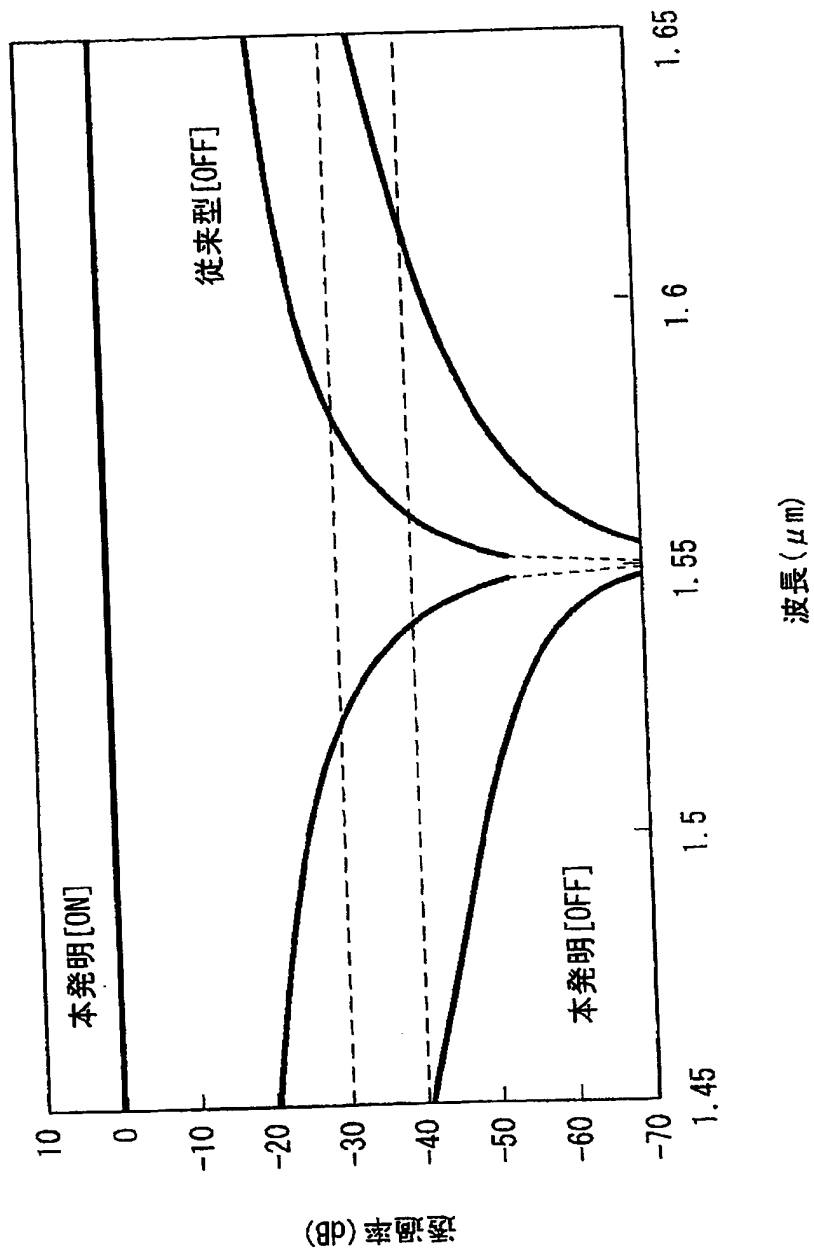


【図 13】

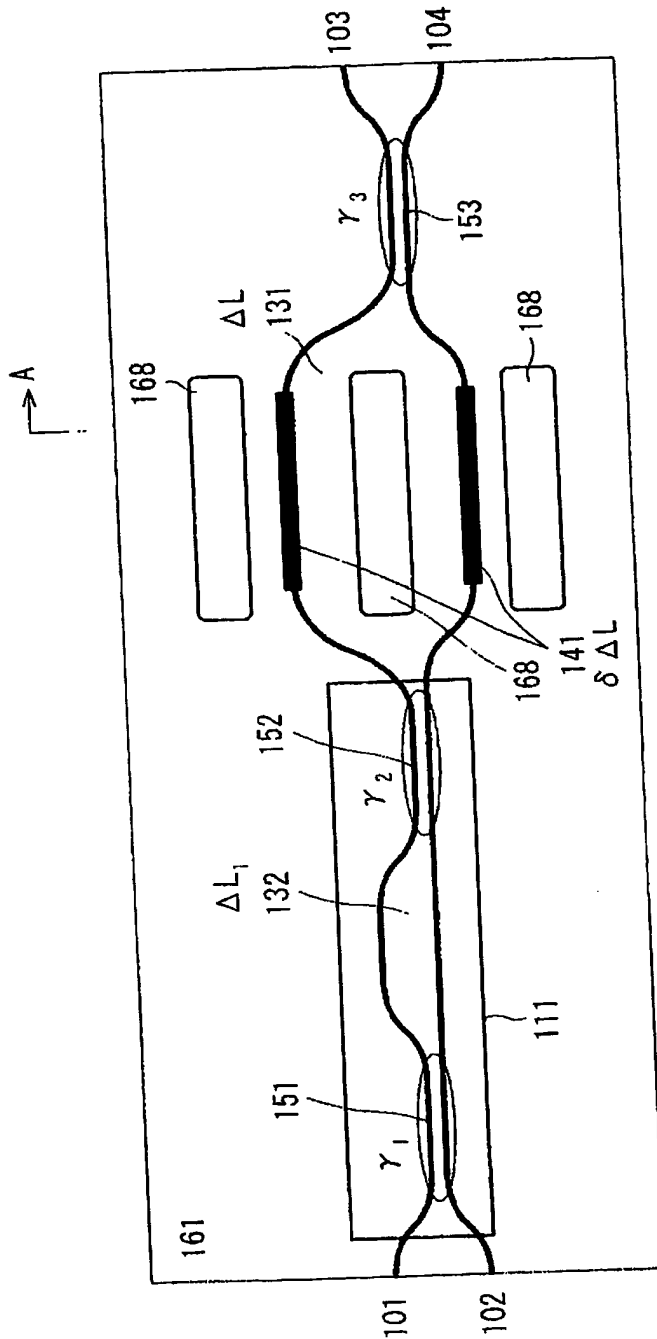


- 101, 102 入力導波路
- 103, 104 出力導波路
- 111, 112 位相補償部
- 131 光路長差付与部
- 132, 133 微小光路長差付与部
- 141 薄膜ヒータ
- 151, 152, 153, 154 方向性結合器
- 161 基板

【図 14】

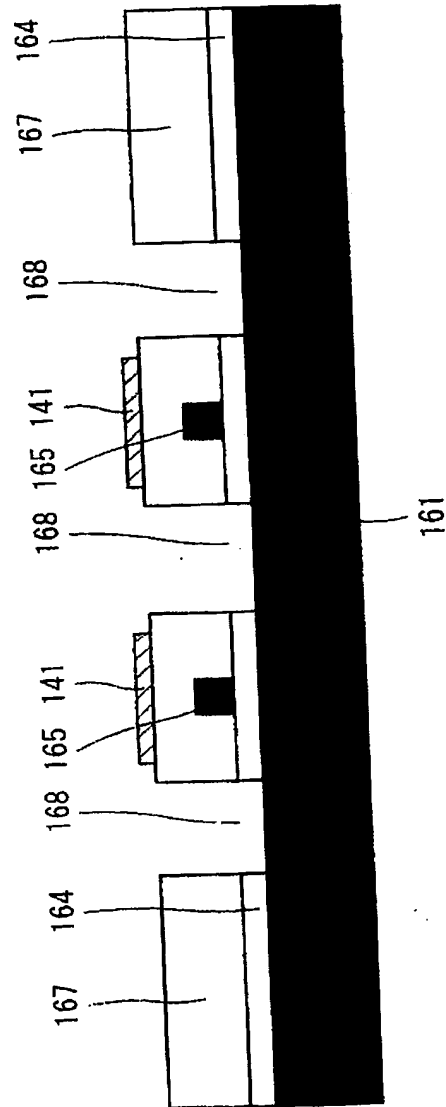


【図15】



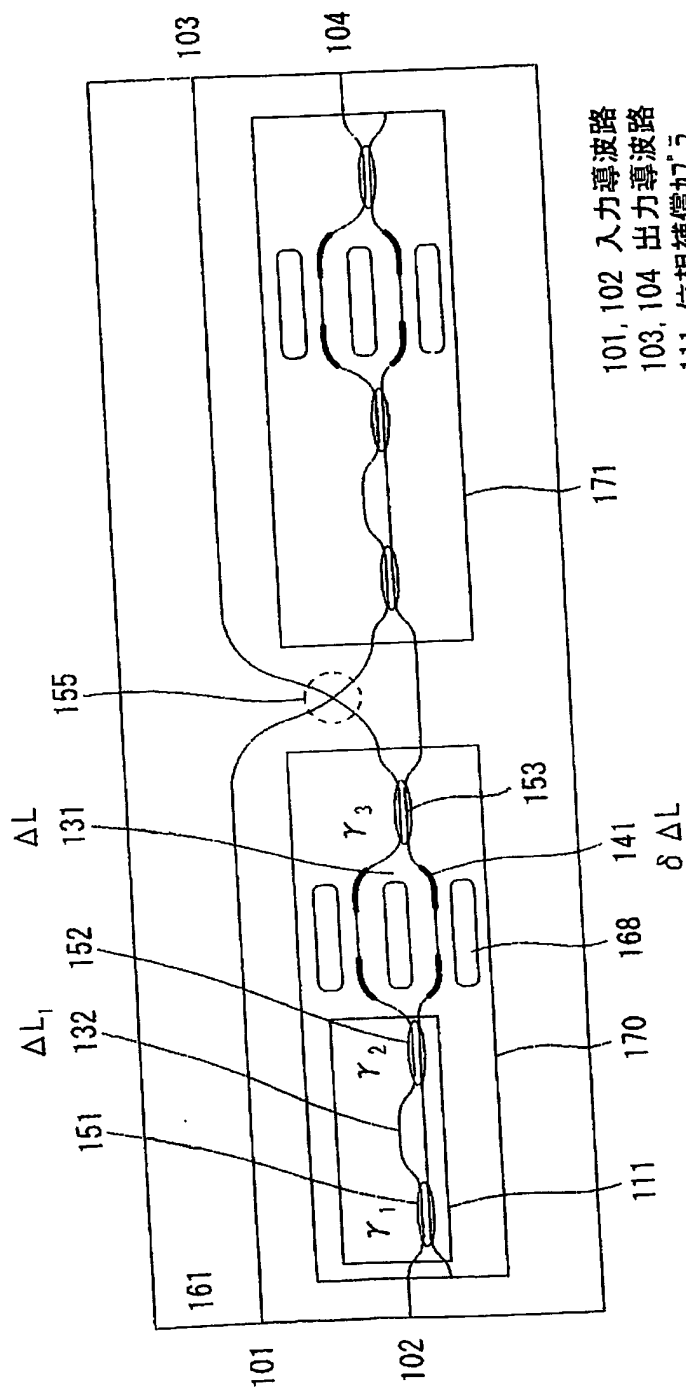
- 101, 102 入力導波路
- 103, 104 出力導波路
- 111 位相補償部
- 131 光路長差付与部
- 132 微小光路長差付与部
- 141 薄膜
- 151, 152, 153 方向性結合器
- 161 基板
- 168 断熱溝

【図16】



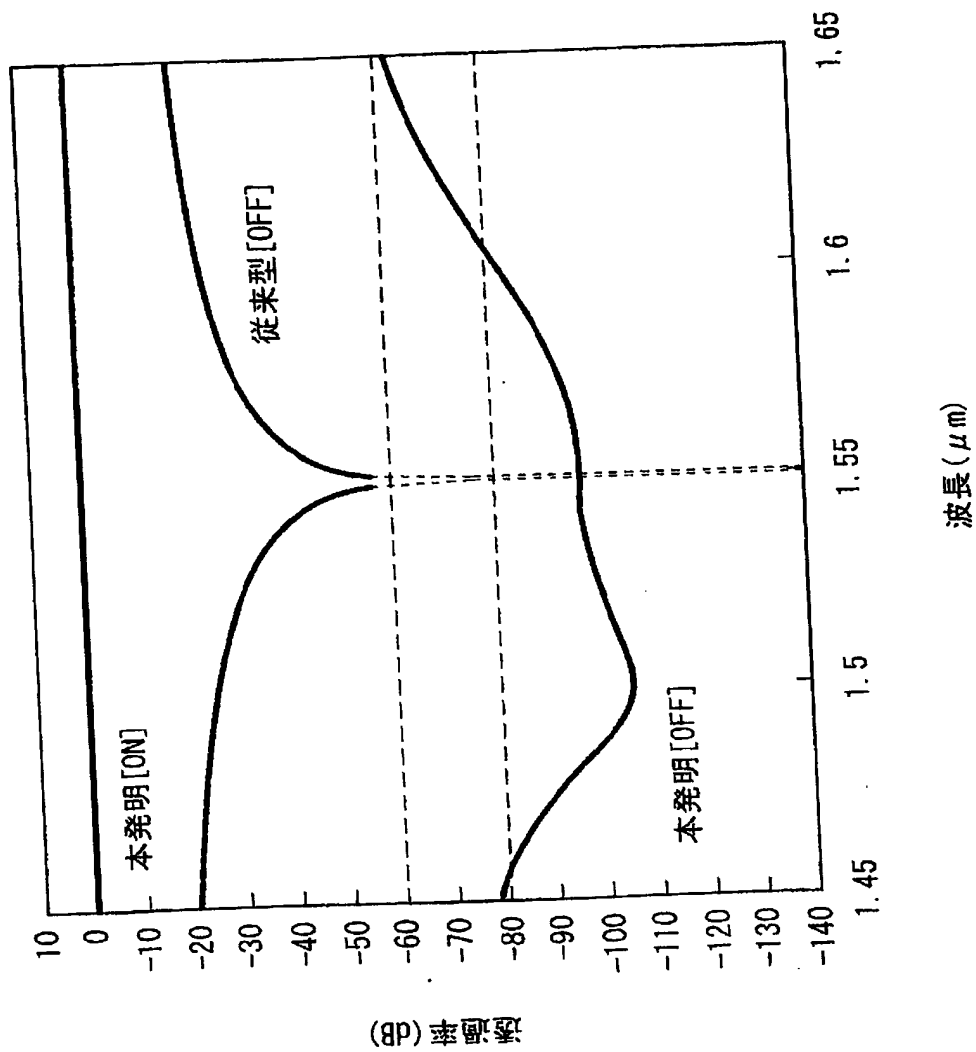
- 141 薄膜ヒータ
- 161 基板
- 164 下部クラッドガラス
- 165 コアガラス
- 167 上部クラッドガラス
- 168 断熱溝

【図17】

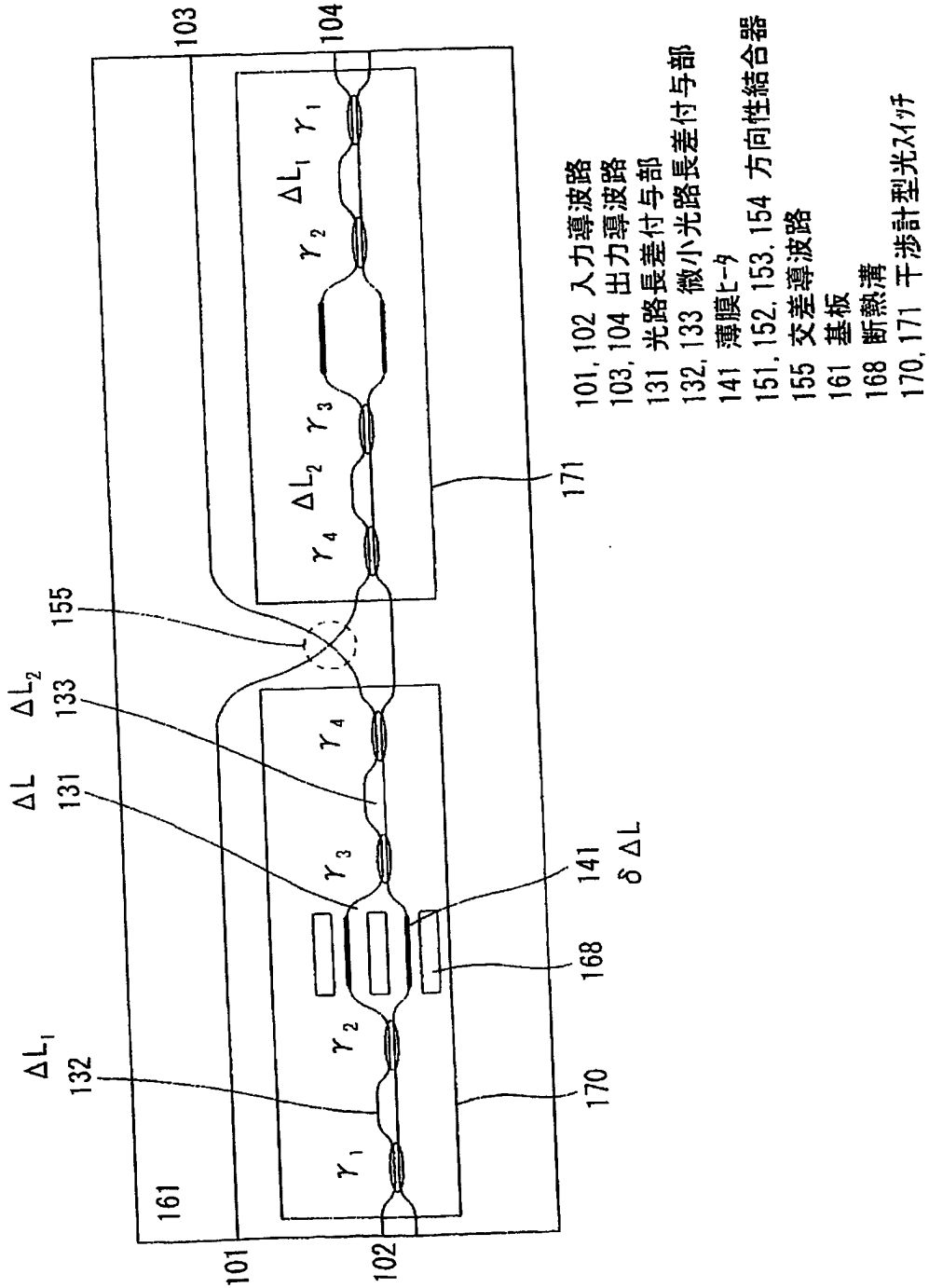


- 101, 102 入力導波路
- 103, 104 出力導波路
- 111 位相補償部
- 131 光路長差付与部
- 132 微小光路長差付与部
- 141 薄膜
- 151, 152, 153 方向性結合器
- 155 交差導波路
- 161 基板
- 168 断熱溝
- 170, 171 干渉計型光スイッチ

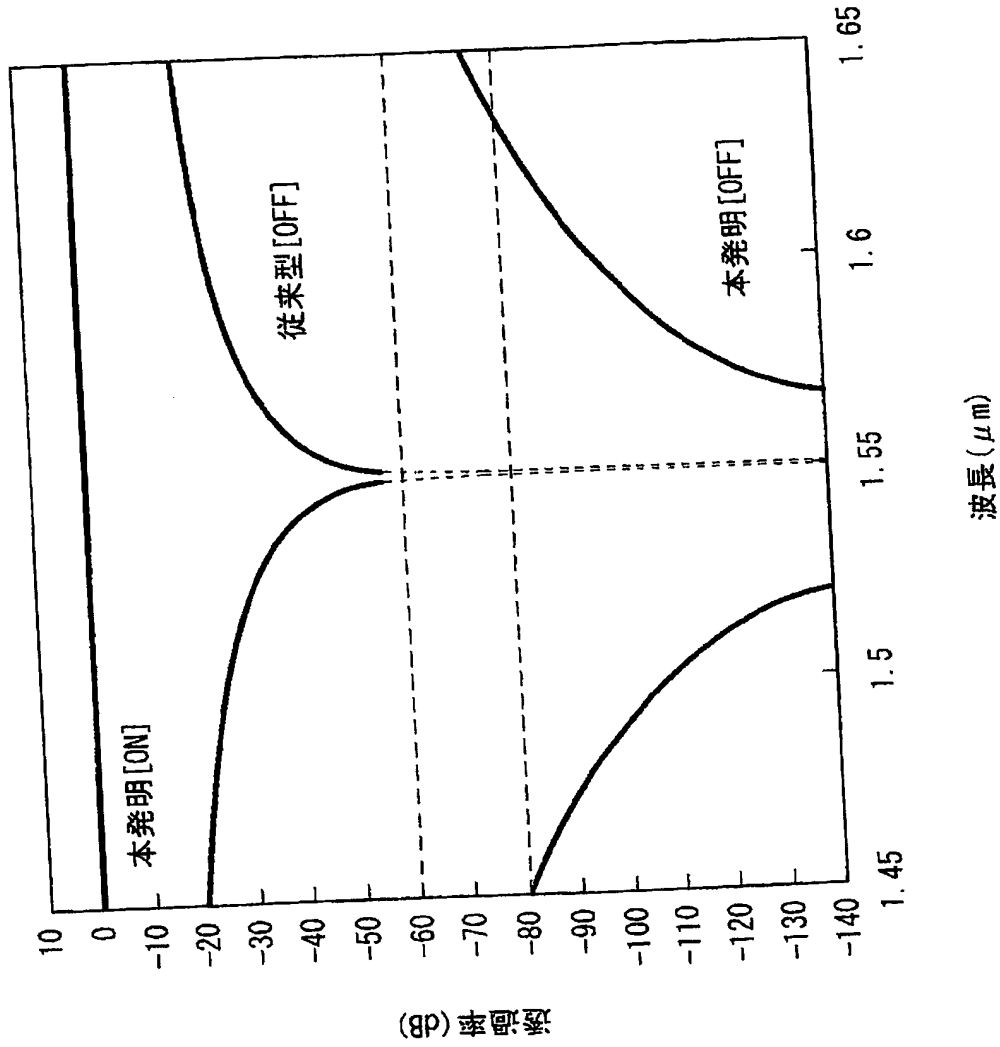
【図18】



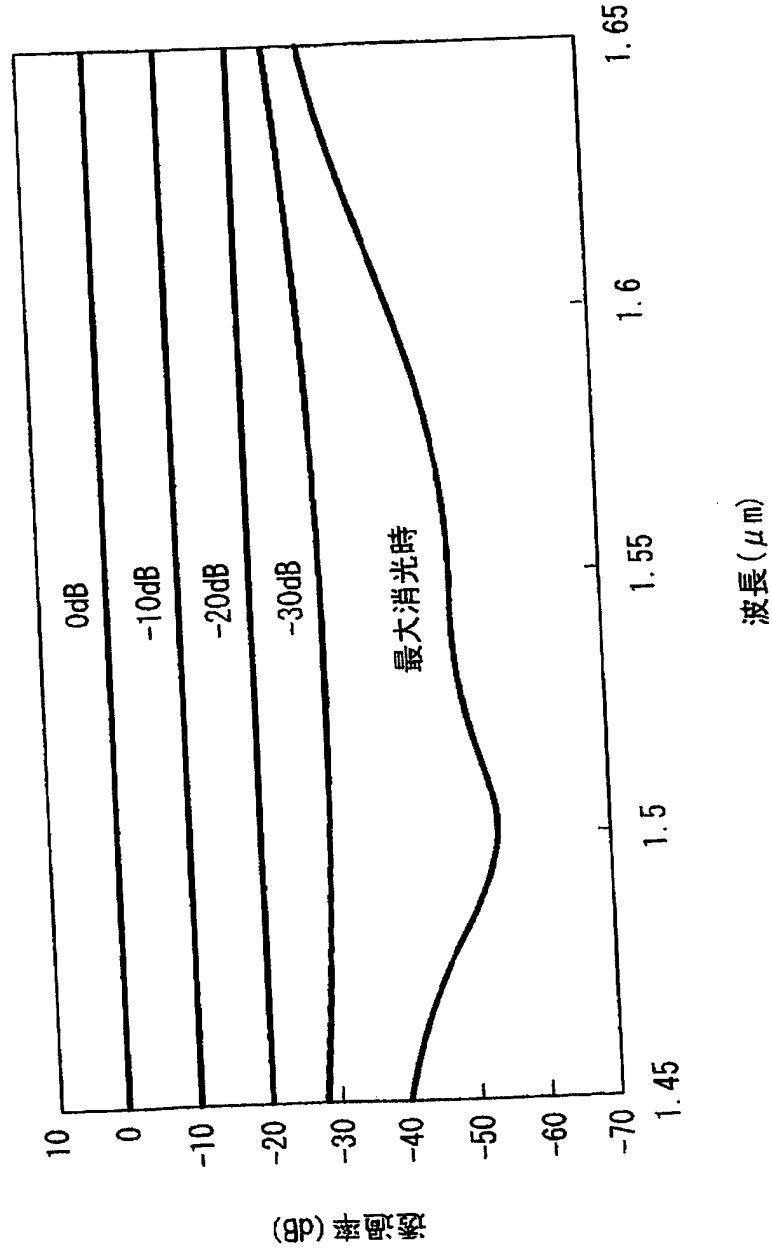
【図19】



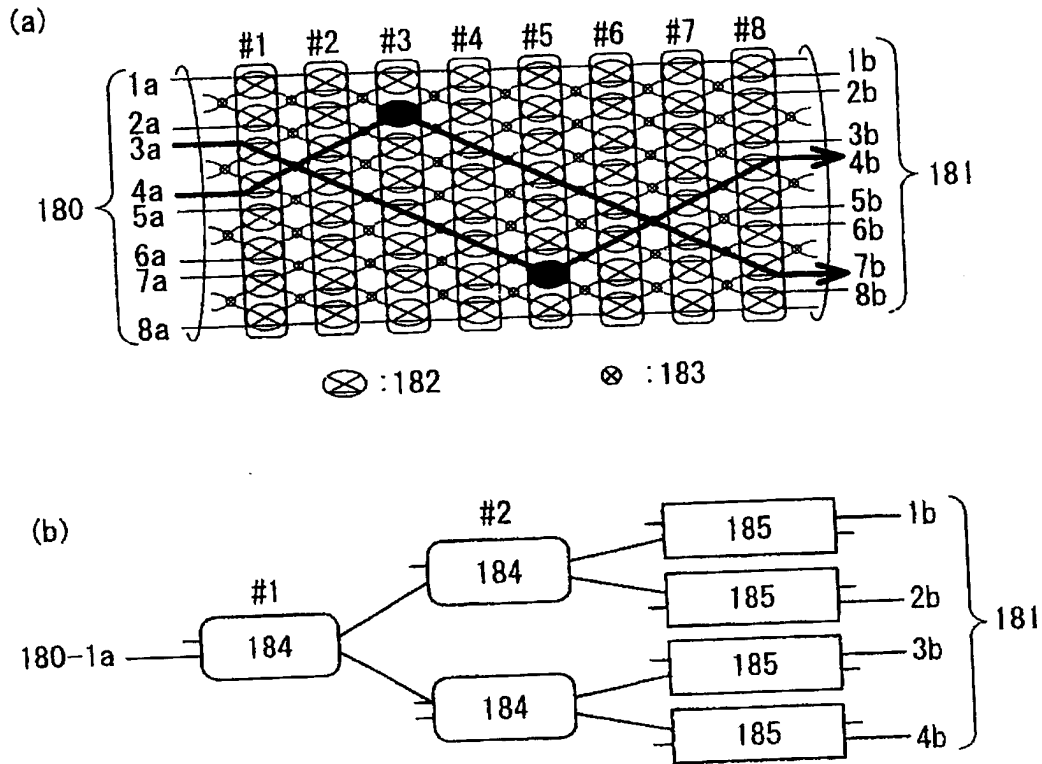
【図20】



【図 2 2】

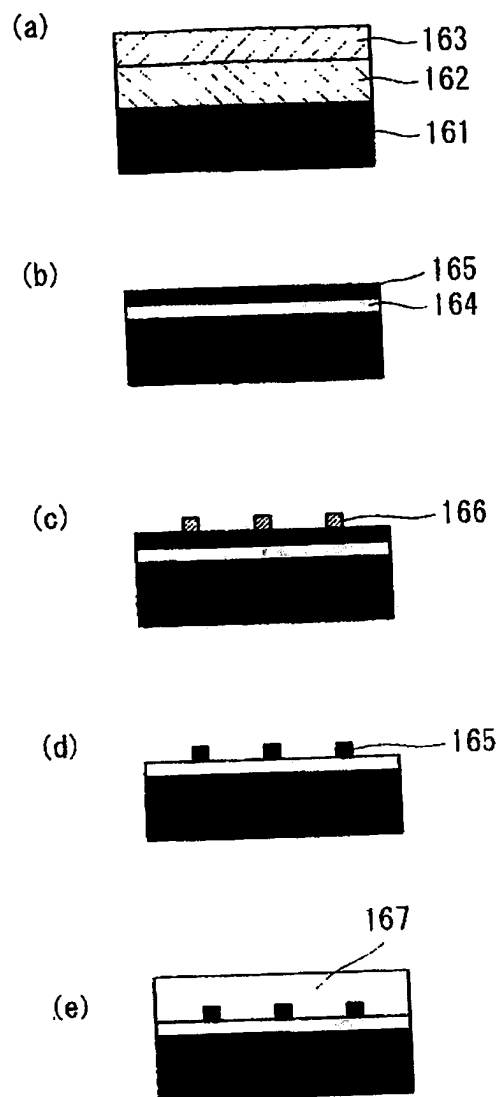


【図 23】



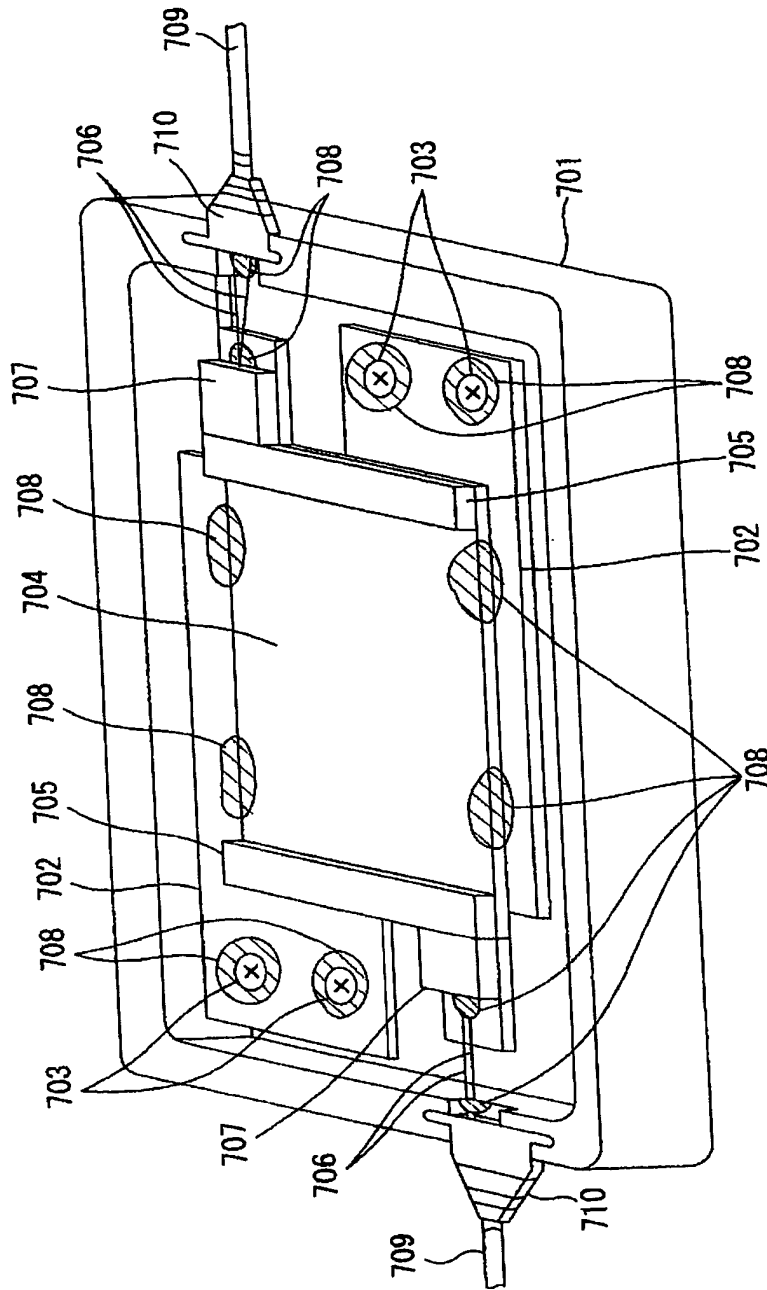
180-1a~8a 入力導波路
 181-1b~8b 出力導波路
 182 光スイッチの基本構成素子
 183 光スイッチの基本構成素子の交差
 184 1×2スイッチ
 185 ゲートスイッチ

【図 24】



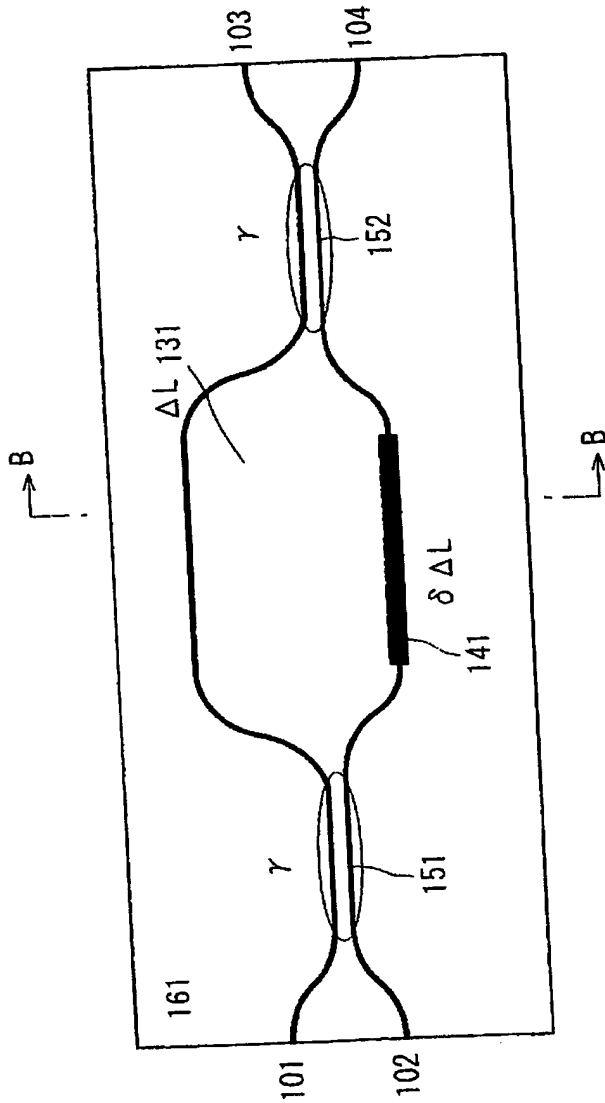
- 161 基板
- 162 下部クラッドガラス
- 163 コアガラス
- 164 下部クラッドガラス
- 165 コアガラス
- 166 エッチングマスク
- 167 上部クラッドガラス

【図25】



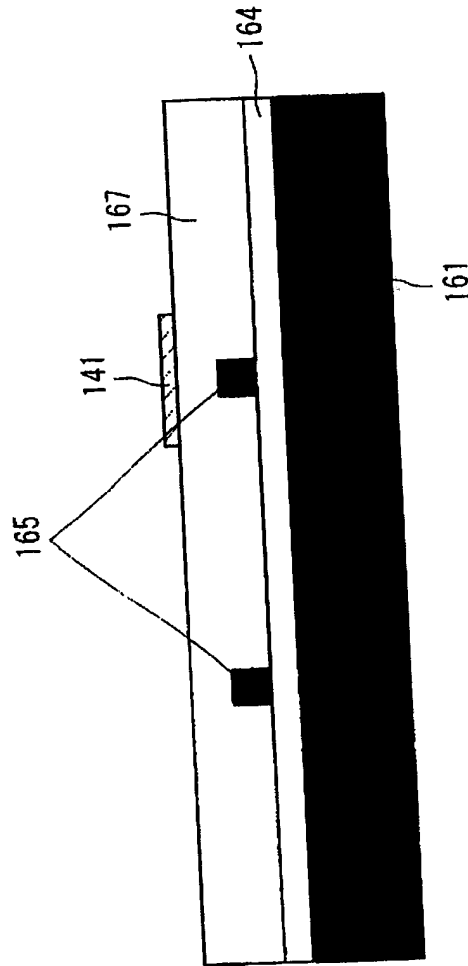
- | | |
|------------|--------------|
| 701 筐体 | 706 プラスチック |
| 702 ベース保持板 | 707 プラスチック |
| 703 固定ねじ | 708 断熱性弾性接着剤 |
| 704 PLCチップ | 709 プラグ |
| 705 ガラス板 | 710 カップ |

【図26】



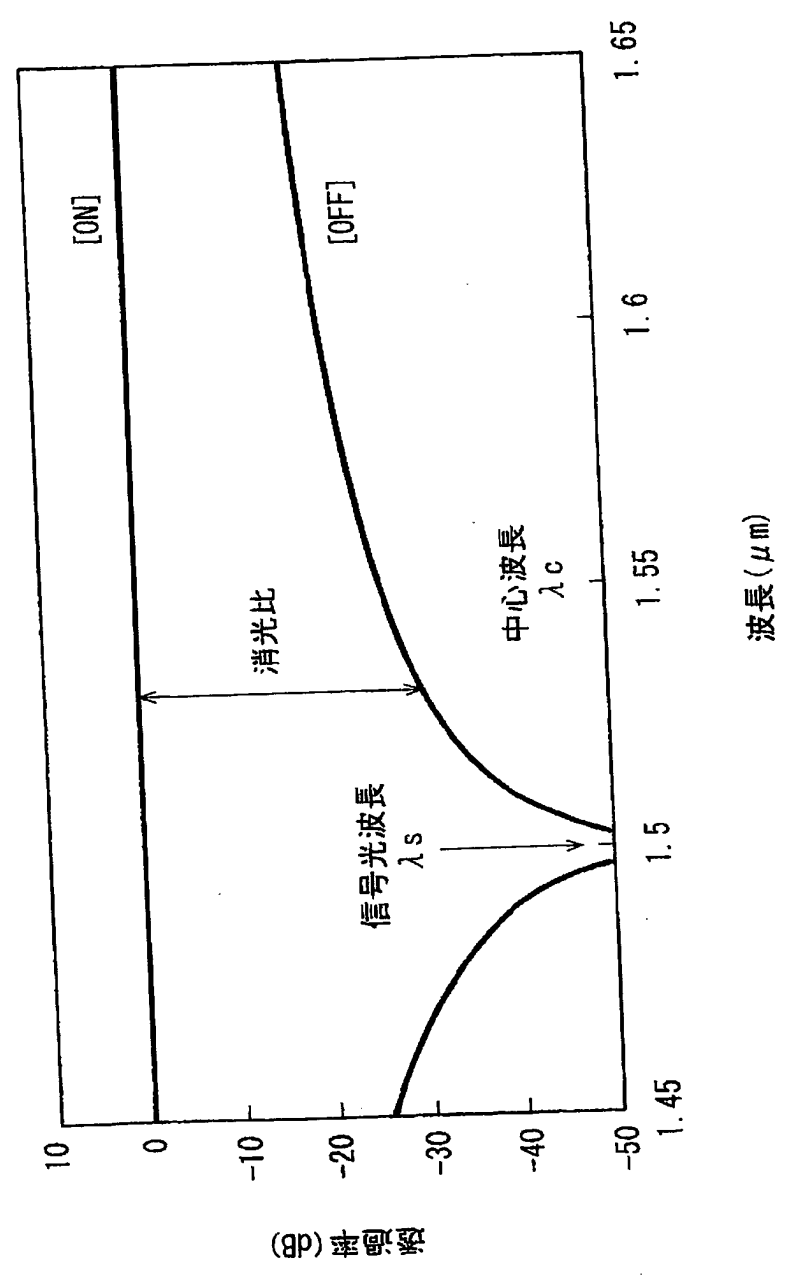
101, 102 入力導波路
103, 104 出力導波路
131 光路長差付与部
141 薄膜
151, 152 方向性結合器
161 基板

【図27】

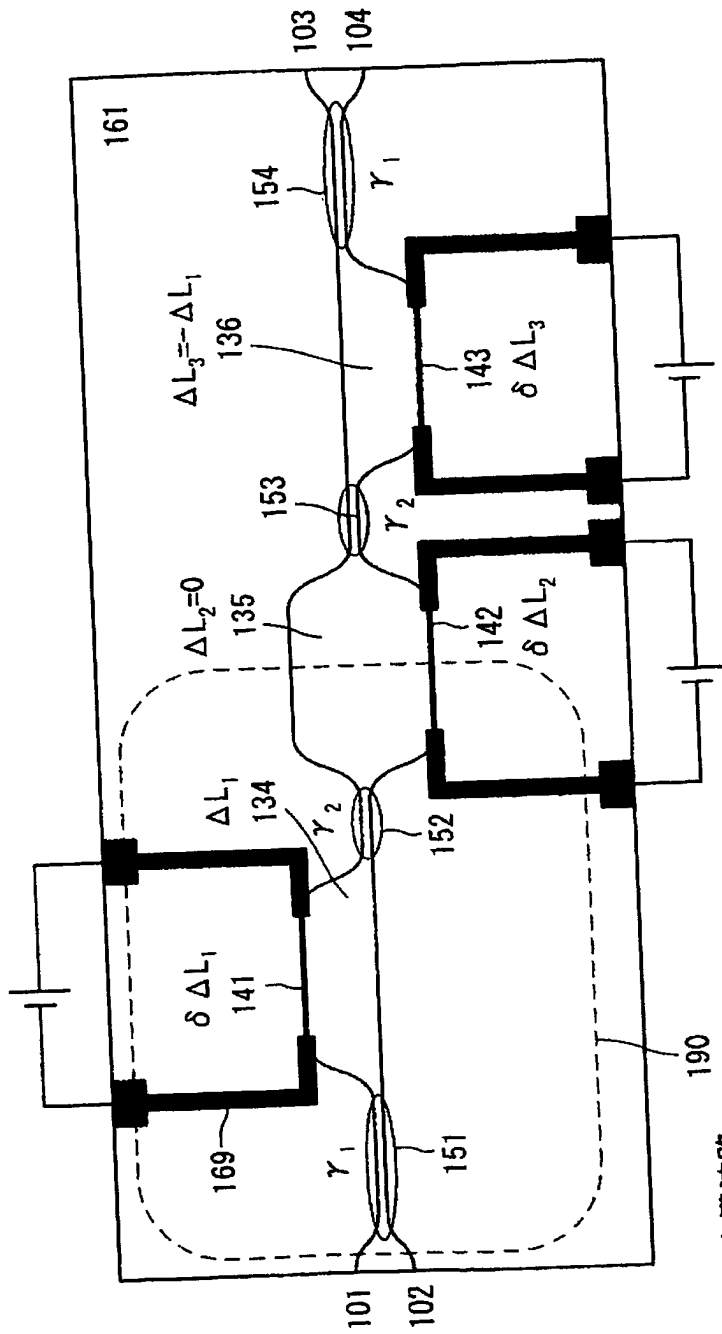


- 141 薄膜ヒータ
- 161 基板
- 164 下部クラッドガラス
- 165 コアガラス
- 167 上部クラッドガラス

【図28】



【図 29】



- 101, 102 入力導波路
- 103, 104 出力導波路
- 131 光路長差付与部
- 134, 135, 136 微小光路長差付与部
- 141, 142, 143 薄膜ヒータ
- 151, 152, 153, 154 方向性結合器
- 161 基板
- 169 電気配線
- 190 基本回路

2003-191797

ページ: 30/E

出証特2004-3074448

【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 広帯域でスイッチング可能であると共に、高消光比で製造トレランス
が大きい干渉計型光スイッチ及びそれを用いた光スイッチモジュールを提供する

。

【解決手段】 光合分波手段として位相補償カップラ 111 を用い、位相補償カップラ 111 より出力される光の位相差 $\phi_1(\lambda)$ と、光路長差付与部 131 の光路長差に起因する位相差 $\phi_{\Delta L}(\lambda)$ と、方向性結合器 153 より出力される光の位相差 $\phi_2(\lambda)$ との総和 $2\pi \{ \phi_1(\lambda) + \phi_{\Delta L}(\lambda) + \phi_2(\lambda) \}$ が $m \cdot \pi$ になるように設定することで、波長無依存の干渉計型光スイッチを実現した。

【選択図】 図 7

特願 2003-191797

出願人履歴情報

識別番号

[000004226]

1. 変更年月日

1999年 7月15日

[変更理由]

住所変更

住所

東京都千代田区大手町二丁目3番1号

氏名

日本電信電話株式会社

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.